



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JUUSO PARTANEN  
SARJALIIKENNEANALYSAATTORIN KEHITTÄMINEN  
Diplomityö

Tarkastaja: Prof. Karri Palovuori  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
Tieto- ja sähkötekniikan  
tiedekuntaneuvoston kokouksessa  
7. marraskuuta 2012

## TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Sähkötekniikan koulutusohjelma

**PARTANEN, JUUSO:** Sarjaliikenneanalysaattorin kehittäminen

Diplomityö, 61 sivua

Lokakuu 2013

Pääaine: Elektroniikan tuotesuunnittelu

Tarkastaja: Professori Karri Palovuori

Avainsanat: Sarjaliikenneanalysaattori, sarjamuotoinen tiedonsiirto, RS-232, RS-422, RS-485

Kahden laitteen välistä sarjamuotoista tiedonsiirtoa voidaan tutkia sarjaliikenneanalysaattorilla. Sarjaliikenneanalysaattori kaappaa tutkittavien laitteiden välillä kulkevat signaalit myöhempää käyttöä ja analysointia varten. Signaalien analysointi voidaan toteuttaa esimerkiksi erillisellä tietokoneella ajettavalla ohjelmistolla.

Sarjaliikenneanalysaattorilla voidaan helposti todeta esimerkiksi laitteiden välisessä tiedonsiirrossa olevat ajoitus- ja kommunikointivirheet. Kommunikoinnista ja ajoituksista johtuvien virheiden havaitseminen ja tutkiminen muuten kuin käyttötarkoitukseen toteutetulla laitteella on aikaa vievää ja haastavaa. Ohjelmallisesti toteutetuissa analysointityökaluissa analysointiin tarvittava laitteisto on PC-laitteiston sisällä, jolloin ollaan täysin riippuvaisia siitä miten käyttöjärjestelmä reagoi signaalilinjojen keskeytyksistä aiheutuviin kutsuihin. Tällöin kaapatun signaalin aikaleima on se, jolloin käyttöjärjestelmä on reagoinut signaalilinjalla tapahtuneeseen muutokseen eikä todellinen signaalilinjan tapahtuma.

Tässä diplomityössä esitetään sarjaliikenneanalysaattorin laitteiston, ohjelmiston ja PC-ohjelman kehittäminen suunnittelusta valmiiseen toteutukseen ja testaukseen saakka. Diplomityössä tutustutaan lisäksi jo markkinoilla oleviin sarjaliikenneanalysaattoreihin sekä niissä oleviin rajoituksiin, joihin tässä diplomityössä suunniteltu sarjaliikenneanalysaattori pyrkii tarjoamaan parannuksia.

## ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Electrical Engineering

**PARTANEN, JUUSO:** Development of Serial Communication Analyser

Master of Science Thesis, 61 pages

October 2013

Major: Electronics Product Design

Examiner: Professor Karri Palovuori

Keywords: Serial analyser, serial communication, RS-232, RS-422, RS-485

Serial communication analysers enable data capture between serial communication devices. This data can then be later processed and analysed for instance on PC software.

Data transfer timing problems and errors can easily be measured by serial communication analysers. Comparing to software based solution by creating own hardware based system the user is totally independent from the limited and unreliable examination possibilities of PC hardware. Software based solutions depend on the interrupt handling latency of the operating system scheduler. Resulting timestamps are equivalent to interrupt request of the operating system, but not real signal events occurring on the signal line.

This Master of Science Thesis includes developing serial communication analyser's hardware, software and PC-software from specification to implementing and testing. This thesis also introduces current serial analysers available on the market and their features on which this thesis suggest improvements.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö toteutettiin Sulaon Oy:lle kevään ja syksyn 2013 aikana. Diplomityössäni haluan kiittää Sulaon Oy:n Jarkko Tuomea sekä työni ohjaajaa Petteri Yrjälää vankkumattomasta tuesta ja erinomaisista neuvoista.

Lisäksi haluan kiittää perhettäni saamastani tuesta ja kannustuksesta koko opiskelujeni ajalta.

Salossa 15. lokakuuta 2013

Juuso Partanen

# SISÄLLYS

1	Johdanto .....	1
2	Tiedonsiirto .....	3
2.1	Simplex, half-duplex ja full-duplex .....	3
2.2	Asynkroninen ja synkroninen tiedonsiirto .....	4
2.3	Balansoitu ja balansoimaton tiedonsiirto .....	6
2.4	Rinnakkaismuotoinen ja sarjamuotoinen tiedonsiirto .....	7
3	Sarjaliikennestandardit .....	8
3.1	RS-232 .....	8
3.1.1	DTE ja DCE .....	8
3.1.2	Toiminta .....	10
3.1.3	Kättelysignaalit .....	12
3.2	RS-422 .....	12
3.3	RS-485 .....	13
3.4	USB .....	15
4	Sovelluksia sarjaliikenneanalysaattorille .....	16
4.1	Käyttökohteet .....	16
4.2	Kaupalliset laitteet .....	17
4.2.1	Multi Protocol Analyzer LE-8200-E .....	17
4.2.2	MSB-RS232 ja MSB-RS485 .....	18
5	Sarjaliikenneanalysaattorin suunnittelu .....	20
5.1	Vaatimukset .....	20
5.2	Kytkenäkaavion suunnittelu .....	21
5.2.1	Mittausadapteri .....	23
5.3	Komponenttien valinnat .....	24
5.3.1	Mikrokontrolleri .....	24
5.3.2	Jänniteregulointi .....	25
5.3.3	GPS .....	25
5.3.4	FT2232H .....	25
5.3.5	Signaalitason valinta .....	26
5.3.6	UART .....	27
5.3.7	ESD .....	27
5.3.8	Tasonmuuntimet .....	27
5.3.9	Kättelysignaalien kaappaus .....	29
5.3.10	Ulkoiset liitännät .....	29
5.4	Piirilevyn suunnittelu .....	31
6	Laitteen ohjelmisto .....	34
6.1	Ohjelmiston perustoiminta .....	34
6.2	Ohjelmiston moduulirakenne .....	35
6.2.1	Main .....	36
6.2.2	Init .....	36

6.2.3	Analyzer .....	36
6.2.4	Fifo .....	37
6.2.5	4Uart.....	37
6.2.6	GPS .....	37
6.3	Asetusten lähettäminen .....	37
6.4	Signaalien mittaus .....	39
6.5	Signaalien tarkka ajoitus .....	40
6.6	GPS-tahdistus .....	41
7	PC-ohjelma.....	42
7.1	Ohjelman yleinen toteutus ja rakenne .....	42
7.2	PC-ohjelman toiminnot .....	44
7.3	Signaalien vastaanottaminen.....	46
7.4	Signaalien piirto .....	48
7.5	Signaalien analysointi .....	50
8	Laitteen testaus.....	51
8.1	Tarkkuuden mittaaminen .....	51
8.2	Suorituskyvyn mittaus.....	53
8.3	Ulkopuolinen tahdistus .....	54
9	Johtopäätökset.....	56
	Lähteet.....	58

## TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

ACLK	Auxiliary clock, mikrokontrollerin oheislaitteille ohjattava kellosignaali.
ADC	Analog-to-digital converter, analogia-digitaalimuunnin.
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor, kanavatransistoreilla toteutettu logiikkapiiriperhe.
CPU	Central Processing Unit, suoritin.
DAC	Digital-to-analog converter, digitaali-analogiamuunnin.
DCE	Data Circuit-Terminating Equipment, liitäntälaitte, esimerkiksi DTE laitteiden välisen kommunikoinnin hoitava modeemi.
DTE	Data Terminal Equipment, päätelaitte. Esimerkki päätelaitteesta: tietokone.
EIA	Electronic Industries Association, elektroniikan standardointiorganisaatio.
FIFO	First In, First Out. Menetelmä, jossa ensimmäisenä saapunut data käsitellään ensin.
Full-duplex	Tiedonsiirtomuoto, jossa data voi liikkua kumpaankin suuntaan samanaikaisesti.
GPIO	General Purpose Interface Bus, rinnakkaismuotoinen tietoliikenneväylä.
GPS	Global Positioning System, satelliittipaikannusjärjestelmä.
Half-duplex	Tiedonsiirtomuoto, jossa data voi liikkua kumpaankin suuntaan, mutta ei samanaikaisesti.
HP-IB	Hewlett Packard Instrumentation Bus. Rinnakkaismuotoinen tietoliikenneväylä.
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineer, kansainvälinen tekniikan alan järjestö.
LDO	Low-dropout, lineaariregulaattorien ominaisuus toimia pienellä tulo- ja lähtöjännitteen erolla.
MCLK	Master clock, mikrokontrollerin CPU:n ja sisäisen järjestelmän kellosignaali.
NMEA	National Marine Electronics Association. Merielektroniikan taustayhdistys, jonka tavoitteena on kehittää oman alansa liiketoimintaa.
PPM	Parts per million, suhdeluku, joka ilmaisee kuinka monta miljoonasosaa jokin on jostakin.
PPS	Pulse-per-second, kerran sekunnissa saatava signaali mm. GPS-vastaanottimesta.

RMC	Recommended Minimum Specific GNSS Data, GPS-vastaanottimelta saatava aika-, päivämäärä-, sijainti-, rata- ja nopeusdata.
RS-232	Sarjaliikennestandardi RS-232 eli sarjaportti.
RS-422	Differentiaalinen sarjaliikennestandardi RS-422.
RS-485	Differentiaalinen sarjaliikennestandardi RS-485.
Simplex	Tiedonsiirtomuoto, jossa data voi liikkua vain toiseen suuntaan.
SMCLK	Sub-main clock, mikrokontrollerin oheislaitteille ohjattava kellosignaali.
SPI	Serial Peripheral Interface Bus, sarjamuotoinen tiedonsiirtoväylä.
TCXO	Temperature Compensated Crystal Oscillator, lämpötilakompensoitu kideoskillaattori.
TIA	Telecommunications Industry Association, elektroniikan standardointiorganisaatio.
TTL	Transistor-Transistor Logic, bipolaarinen logiikkapiiriperhe.
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter. Oheislaitte, joka muuntaa rinnakkaismuotoista dataa sarjamuotoiseksi.
USB	Universal Serial Bus, sarjaväyläarkkitehtuuri oheislaitteiden liittämiseksi tietokoneeseen.
UTC	Coordinated Universal Time. Koordinoitu yleisaika, joka seuraa kansainvälistä atomiaikaa.



# 1 JOHDANTO

Sarjamuotoinen tiedonsiirto käsitetään yleisesti tietokoneen DTE (Data Terminal Equipment) ja oheislaitteen DCE (Data Circuit-Terminating Equipment) välisenä kommunikaationa, esimerkiksi tietokoneen ja modeemin tai tietokoneen ja kirjoittimen välisenä tiedonsiirtona. Sarjamuotoisen tiedonsiirron perusstandardi RS-232:n ensimmäinen versio julkaistiin jo vuonna 1962, mutta se on vielä nykypäivänäkin yksinkertaisuutensa vuoksi yleisesti käytössä. RS-232-standardin julkaisun jälkeen on tullut useita muita sarjaliikennestandardeja kuten RS-422 ja RS-485, jotka tarjoavat parannuksia RS-232-standardiin verrattuna. RS-422 ja RS-485 ovat RS-232:n tavoin edelleen käytössä muun muassa teollisuudessa.

Tilanteissa joissa halutaan analysoida sarjaliikennelaitteen lähettämää ja vastaanottamaa dataa, käytetään sarjaliikenneanalysaattoreita. Sarjaliikenneanalysaattoreilla laitteen lähettämä ja vastaanottama dataliikenne saadaan kaapattua, ja tästä voidaan aikaleimojen perusteella generoida käyttäjälle esimerkiksi graafinen kuvaaja dataliikenteen analysointia varten. Kommunikoinnista ja ajoituksista johtuvien virheiden havaitseminen ja tutkiminen pelkästään ohjelmallisesti on aikaa vievää ja haastavaa, jolloin laitteistolla toteutetulla analysoinnilla saavutetaan huomattavia etuja ohjelmalliseen analysointiin verrattuna. Ohjelmallisesti toteutetuissa ratkaisuissa analysointiin tarvittava laitteisto on PC-laitteiston sisällä, jolloin ollaan täysin riippuvaisia siitä, miten käyttöjärjestelmä reagoi signaalilinjojen keskeytyksistä aiheutuviin kutsuihin.

Tämä diplomityö käsittelee sarjaliikenneanalysaattorin kehittämisen laitteen haluttujen toimintojen määrittelystä valmiin laitteen ja ohjelmiston suunnitteluun ja toteutukseen saakka. Laitteesta on sen suunnittelussa ja toteutuksessa pyritty saamaan mahdollisimman monipuolinen. Lisäksi laitteen tulisi sisältää laajennusmahdollisuuksia mahdollisesti myöhemmin haluttaviin toimintoihin, joita tässä työssä ei vielä ole toteutettu. Tavoitteena on suunnitella ja toteuttaa laite, joka on markkinoilla oleviin laitteisiin verrattuna monikäyttöisempi ja joka tarjoaa toimintoja, joita markkinoilla olevat laitteet eivät pysty tarjoamaan.

Tässä diplomityössä käsitellään aluksi tiedonsiirron periaatteita ja tutustutaan sarjamuotoisiin tiedonsiirtostandardeihin. Lisäksi tutustutaan jo markkinoilla oleviin sarjaliikenneanalysaattoreihin sekä niiden ominaisuuksiin. Sarjaliikenneanalysaattorin toteutuksessa käydään läpi laitteen ja ohjelmiston suunnittelu ja toteutus sekä syyt tehdyille ratkaisuille. Diplomityössä esitellään myös sarjaliikenneanalysaattorin käyttöä ja vastaanotetun datan analysointia varten toteutettu PC-ohjelma. Työssä kerrotaan lisäksi sarjaliikenneanalysaattorille tehdystä testeistä, joilla rakennetun laitteen oikea

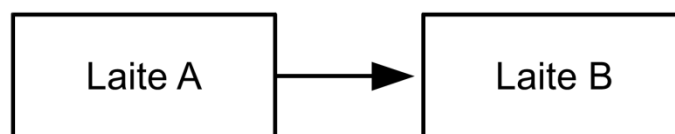
toiminnallisuus on voitu todentaa. Työn lopuksi esitellään loppupäätelmät, jossa kerrotaan miten sarjaliikenneanalyysoijan toteutukselle asetetut tavoitteet on saavutettu.

## 2 TIEDONSIIRTO

Tässä luvussa tutustutaan tiedonsiirron käsitteisiin. Luvussa selitetään muun muassa käsitteet simplex, half-duplex ja full-duplex. Lisäksi esitellään synkronisen ja asynkronisen tiedonsiirron periaatteet sekä kerrotaan balansoidusta ja balansoimattomasta tiedonsiirrosta. Lopuksi tutustutaan rinnakkais- ja sarjamuotoisen tiedonsiirron periaatteisiin.

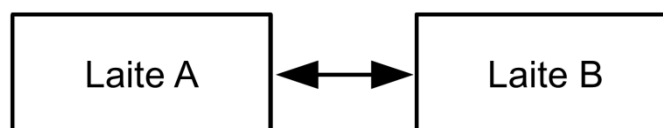
### 2.1 Simplex, half-duplex ja full-duplex

Tiedonsiirto voidaan jaotella kolmen erilaisen toimintatavan mukaan. Simplex-käsitteen mukaisesti tiedonsiirto tapahtuu vain yhteen suuntaan, jolloin toinen laitteista toimii koko ajan lähettäjänä ja toinen vastaanottajana. [1] Simplex-tiedonsiirtoa on esimerkiksi radion kuuntelu ja television katselu. Simplex-järjestelmän tiedonsiirtoperiaate on esitetty kuvassa 2.1.



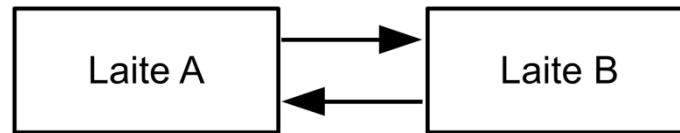
**Kuva 2.1.** Simplex-tyyppisessä tiedonsiirrossa data liikkuu vain yhteen suuntaan. [2]

Half-duplex-järjestelmän tiedonsiirrossa data voi liikkua molempiin suuntiin, mutta vain yhteen suuntaan kerrallaan. Tällöin toinen laite toimii vuorollaan lähettäjänä ja toinen vastaanottajana. [1] Half-duplex-tiedonsiirtoa on esimerkiksi kahden henkilön kommunikointi radiopuhelimien välityksellä, jolloin toinen toimii kerrallaan kuuntelijana ja toinen puhujana. Half-duplex-järjestelmän tiedonsiirtoperiaate on esitetty kuvassa 2.2.



**Kuva 2.2.** Half-duplex-tyyppisessä tiedonsiirrossa data voi liikkua molempiin suuntiin mutta ei samanaikaisesti. [2]

Full-duplex-järjestelmän tiedonsiirrossa data voi liikkua molempiin suuntiin samanaikaisesti. Tällöin molemmat laitteet voivat toimia samanaikaisesti sekä lähettäjinä että vastaanottajina. [1] Full-duplex-tiedonsiirtoa on esimerkiksi kahden henkilön samanaikainen mahdollisuus kommunikoida puhelinlinjalla. Full-duplex-järjestelmän tiedonsiirtoperiaate on esitetty kuvassa 2.3.



**Kuva 2.3.** Full-duplex-tyyppisessä tiedonsiirrossa data voi liikkua samanaikaisesti molempiin suuntiin. [2]

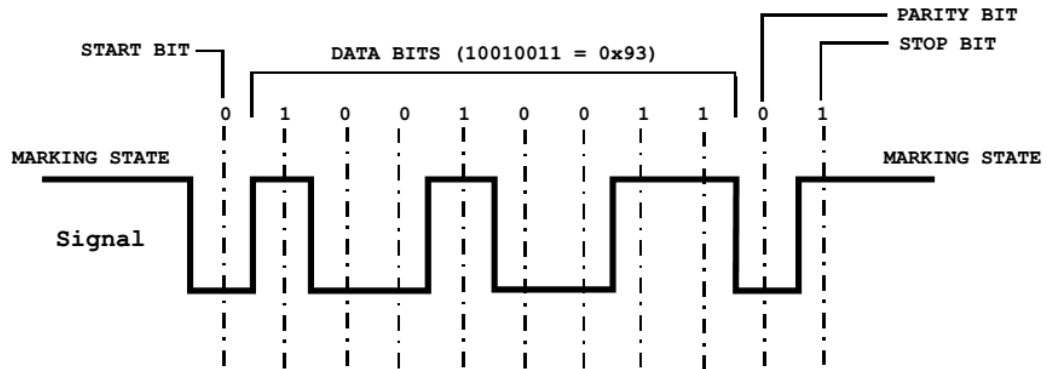
## 2.2 Asynkroninen ja synkroninen tiedonsiirto

Sarja- ja rinnakkaismuotoinen tiedonsiirto voi tapahtua joko asynkronisesti tai synkronisesti. Asynkronisessa tiedonsiirrossa lähettäjän ja vastaanottajan kellosignaalit eivät ole synkronoituja eli tahdistettuja. Tällöin lähetetty ja vastaanotettu data on tahdistettu eri kellosignaaleilla. [3] Asynkronisessa tiedonsiirrossa vastaanottajan valmistaminen datan vastaanottoon tapahtuu dataan liitettävällä ohjaustiedolla, josta tiedetään vastaanotettavan datan alku- ja loppukohta. [4]

Asynkronisessa tiedonsiirrossa lähetyksen alkaminen kerrotaan vastaanottajalle erillisellä start-bitillä ja lähetyksen loppuminen stop-bitillä. Start-bitti edeltää jokaista lähetettävää tavua eli merkkiä. Lähetettävää tavua seuraa lisäksi yksi tai useampi stop-bitti. Ennen stop-bittejä voidaan lisätä pariteettitarkistusta varten pariteettibitti. Parillisessa pariteetissa lisätään pariteetiksi bitti ”1”, jos lähetettävän merkin ykkösbittien määrä on pariton. Vastaavasti parittomassa pariteetissa lisätään pariteetiksi bitti ”1”, jos lähetettävän merkin ykkösbittien määrä on parillinen. [4]

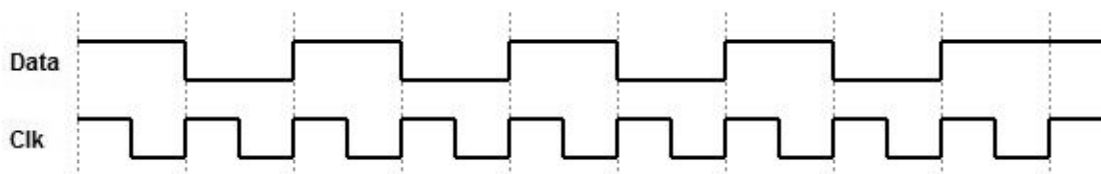
Tiedonsiirtolinjan ollessa odotustilassa pidetään linjaa tyypillisesti loogisessa tilassa ”1”. Tiedonsiirron alkaessa linjan tila siirtyy loogiseen tilaan ”0”, joka tulkitaan start-bittinä. Vastaanotin valmistautuu tällöin tiedonsiirtoon ja vastaanottaa ennalta sovitun määrän bittejä. Vastaanoton loppuminen havaitaan, kun tarvittava määrä stop-bittejä on vastaanotettu. Stop-bitti tulkitaan tilaksi, jolloin datalinja jää loogiseen tilaan ”1”. Onnistuneen tiedonsiirron edellytyksenä on, että lähettäjän ja vastaanottajan tiedonsiirtoasetukset ovat samat. [4]

Kuvassa 2.4 on esitettyä asynkronisen tiedonsiirron periaate. Lähetyksen alussa on yksi start-bitti (START BIT) kertomassa lähetyksen alkamisesta. Start-bittiä seuraa lähetetty data (DATA BITS) 0x93. Lähetyksen loppuksi on pariteettibitti (PARITY BIT) sekä stop-bitti (STOP BIT) kertomassa lähetyksen loppumisesta.



**Kuva 2.4.** Asynkronisessa tiedonsiirrossa tahdistaminen tapahtuu dataan liitettävällä ohjaustiedolla. [4]

Synkronisessa tiedonsiirrossa lähettäjän ja vastaanottajan tiedonsiirtolohkojen kellosignaalit ovat tahdistettuja. Lähettäjän ja vastaanottajan kellosignaalien tahdistus voidaan toteuttaa erillisellä kellolinjalla, joka kulkee lähettäjän ja vastaanottajan välillä. Synkronisessa tiedonsiirrossa ei käytetä erillisiä start- ja stop-bittejä vaan datalähetyksen alku ja loppu kerrotaan vastaanottajalle bittikuvion avulla. Tiedonsiirto alkaa, kun vastaanottaja havaitsee ennalta sovitun bittikuvion. Lähetettävän datan lisäksi lähetys sisältää tyypillisesti myös kontrollidataa. Tiedonsiirto loppuu, kun vastaanottajalle lähetetään sama bittikuvio kuin lähetyksen alussa. Yksi bittikuvio on tyypillisesti 8-bittia pitkä. [5] Synkronisen tiedonsiirron periaate on esitetty kuvassa 2.5, jossa lähetettävä data on tahdistettu kellosignaalilla.

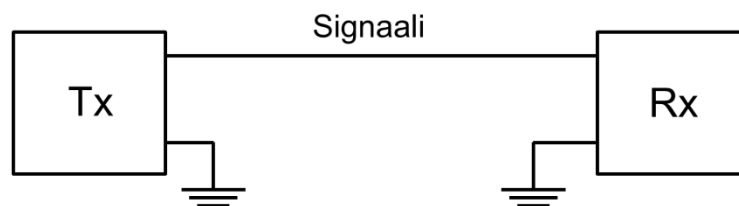


**Kuva 2.5.** Synkroninen tiedonsiirto on tahdistettu kellosignaalilla. [6]

Asynkronisen tiedonsiirtomuodon etuina voidaan pitää sen yksinkertaisuutta ja edullisuutta. Haittapuolena on, että jokaista lähetettävää merkkiä kohden lähetetään myös ylimääräisiä bittejä, jotka kertovat merkin lähetyksen aloitus- ja lopetuskohdan sekä mahdollisesti myös pariteettibitin. Synkronisen tiedonsiirron etuna voidaan pitää sen nopeutta. Vaikka synkronisessa tiedonsiirrossa lähetetään tieto lähetyksen alkamisesta ja loppumisesta sekä kontrollitietoa, mahdollistaa synkroninen tiedonsiirto useamman merkin peräkkäisen lähetyksen samassa paketissa. Lähetettäessä suuria datamääriä on synkroninen tiedonsiirto tällöin asynkronista tiedonsiirtoa tehokkaampaa. Synkronisen tiedonsiirron haittapuolena on sen monimutkaisempi toteutus asynkroniseen tiedonsiirtoon verrattuna. [5]

## 2.3 Balansoitu ja balansoimaton tiedonsiirto

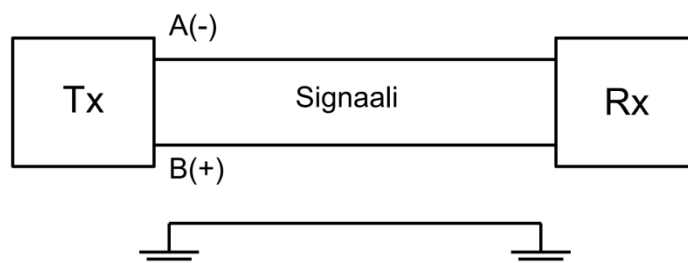
Balansoimattomassa tiedonsiirrossa siirrettävä datasignaali kulkee yhdessä signaalijohtimessa ja sitä verrataan referenssinä toimivaan maapotentiaaliin. Teoriassa balansoimaton tiedonsiirto toimii hyvin johtimen impedanssin ja virran ollessa pieniä. Käytännössä balansoimaton tiedonsiirto toimii vain lyhyillä tiedonsiirtoetäisyyksillä, sillä maapotentiaali toimii referenssinä myös monille muille signaaleille ja elektronisille komponenteille. Pitkillä tiedonsiirtoetäisyyksillä referenssinä toimivaan maapotentiaaliin kytkeytyy helposti häiriötä, jolloin referenssin arvo vaihtelee. Balansoimattoman tiedonsiirron periaate on esitettyä kuvassa 2.6. Kuvassa tiedonsiirto tapahtuu simplex-tyyppisesti, jossa lähettäjä (Tx) lähettää dataa vastaanottajalle (Rx). [7]



**Kuva 2.6.** Balansoimaton tiedonsiirto. [7]

Balansoidussa tiedonsiirrossa jokainen datasignaali lähetetään differentiaalista signaalilinjaa pitkin. Differentiaalinen signaalilinja koostuu toisiinsa kierretyistä kahdesta johtimesta. Differentiaalinen tiedonsiirto eliminoi balansoimattomassa tiedonsiirrossa esiintyvät häiriöiden kytkeytymiset, sillä häiriöt kytkeytyvät molempiin johtimiin yhdessä mutta differentiaalinen jännite pysyy häiriöstä huolimatta samana. [7]

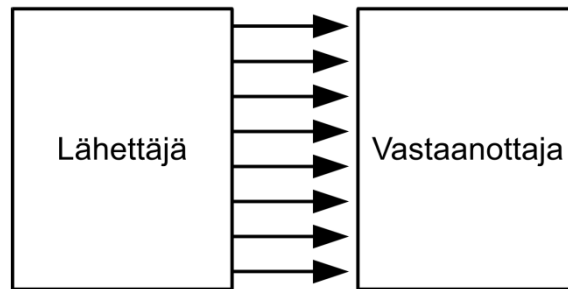
Differentiaalista johdinparia merkitään yleensä kirjaimilla A ja B. Johtimessa A oleva signaali on käännettynä ja johtimessa B tieto on kääntämätön. Balansoitu tiedonsiirto ja sen toimintaperiaate on esitettyä kuvassa 2.7. Kuvassa tiedonsiirto tapahtuu simplex-tyyppisesti, jolloin lähettäjä (Tx) lähettää dataa vastaanottajalle (Rx) differentiaalista signaalilinjaa pitkin. [7]



**Kuva 2.7.** Lähettäjän (Tx) ja vastaanottajan (Rx) välinen balansoitu tiedonsiirto. [7]

## 2.4 Rinnakkaismuotoinen ja sarjamuotoinen tiedonsiirto

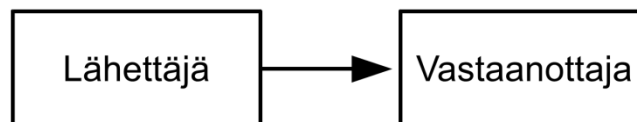
Rinnakkaismuotoinen tiedonsiirto on kahden tai useamman bitin lähettämistä samanaikaisesti ja rinnakkain. Laitteet kytketään toisiinsa usean johtimen välityksellä, jolloin jokainen johdin vastaa tietyistä lähetettävän datan osasta. [4] Rinnakkaismuotoisen tiedonsiirron periaate on esitetty kuvassa 2.8.



**Kuva 2.8.** Rinnakkaismuotoisessa tiedonsiirrossa data siirtyy samanaikaisesti useammassa johtimessa. [2]

Tunnetuin rinnakkaismuotoinen tiedonsiirtostandardi on GPIB-väylä (General Purpose Interface Bus). Väylän kehitti 1960-luvun loppupuolella yhdysvaltalainen Hewlett Packard tietokoneidensa ja oheislaitteiden liittämistä varten, jolloin se tunnettiin nimellä HP-IB (Hewlett Packard Instrumentation Bus). Vuonna 1975 IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineer) standardoi väylän nimellä IEEE-488. GPIB-väylässä on 24 rinnakkaista linjaa ja se muodostuu kahdeksasta datalinjasta, viidestä kontrollilinjasta, kolmesta kättelylinjasta ja kahdeksasta maalinjasta. [8]

Sarjamuotoisessa tiedonsiirrossa data ja ohjaussignaalit lähetetään yhtä linjaa pitkin peräkkäisenä bittivirtana lähettävältä laitteelta vastaanottavalle laitteelle. Esimerkki sarjamuotoisesta tiedonsiirrosta on SPI-väylä (Serial Peripheral Interface). SPI-väylä on synkronoitu sarjaväylä, jossa data liikkuu full-duplex-periaatteella laitteiden välillä. [9, 10] Sarjamuotoisen tiedonsiirron periaate on esitetty kuvassa 2.9.



**Kuva 2.9.** Sarjamuotoisessa tiedonsiirrossa data siirtyy peräkkäisenä bittivirtana. [2]

Rinnakkaismuotoista tiedonsiirtoa käytetään lyhyillä tiedonsiirtoetäisyyksillä ja suurilla nopeuksilla. Sarjamuotoinen tiedonsiirto soveltuu pitkille tiedonsiirtoetäisyyksille, sillä on kustannustehokkaampaa rakentaa sarjamuotoinen tiedonsiirtoverkko enemmän kuin useamman johtimen vaativa rinnakkaismuotoinen tiedonsiirtoverkko. [8]

## 3 SARJALIIKENNESTANDARDIT

Tässä luvussa esitellään laitteiden välistä tiedonsiirtoa varten julkaistuja sarjaliikennestandardeja. Sarjaliikennestandardeista esitellään tunnetuimmat RS-standardit (Recommended Standard), joiden julkaisujärjestönä toimii Telecommunications Industry Association (TIA). Vuoteen 1998 saakka RS-standardien julkaisijana toimi Electronic Industries Association (EIA). [11] Luvussa tutustutaan RS-standardien lisäksi USB-väylään (Universal Serial Bus).

### 3.1 RS-232

1960-luvulla tietokoneiden nopea kehittyminen johti kasvaviin vaatimuksiin tietokoneiden välisen tiedonsiirron kehittämisestä pitkien etäisyyksien välille. 1960-luvun julkinen puhelinverkko tarjosi osaltaan jo valmiin infrastruktuurin tietokoneiden väliseen kommunikointiin. Tietokoneiden ollessa digitaalisia ja puhelinverkon välittäessä analogista äänisignaalia, vaadittiin tietokoneen ja puhelinverkon välille laite, joka muuttaisi digitaalisen signaalin analogiseksi ja päinvastoin. [3]

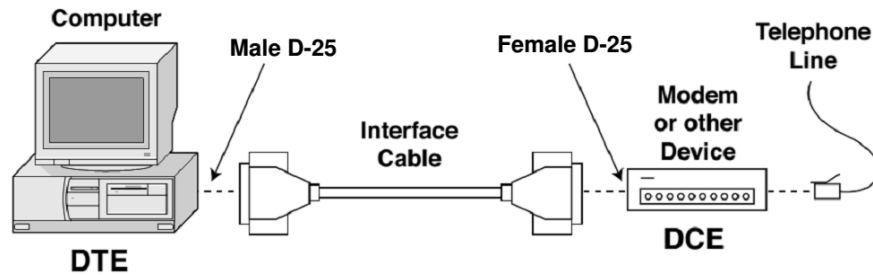
EIA julkaisi ensimmäisen RS-232-standardin vuonna 1962 sarjamuotoisen tiedonsiirron tarpeisiin tietokoneen ja modeemin väliselle tietoliikenteelle. [12] Vuonna 1969 RS-232-standardista julkaistiin versio RS-232-C, joka määritteli RS-232-rajapinnan mekaaniset, toiminnalliset ja sähköiset ominaisuudet. RS-232-standardi ei kuitenkaan määrittele päätelaitteen (DTE) ja liitäntälaitteen (DCE) välisessä tiedonsiirrossa käytettäviä tiedonsiirtoprotokollia. [13] Standardin tavoitteena oli varmistaa tiedonsiirron luotettavuus, mutta ennen kaikkea mahdollistaa eri valmistajien laitteiden välinen yhteensopivuus. [12] RS-232-standardi tunnetaan myös yleisti COM-eli sarjaporttina.

#### 3.1.1 DTE ja DCE

RS-232-standardin mukainen tiedonsiirto tapahtuu DTE- ja DCE-laiteparin välillä. DTE on tyypillisesti tietokone tai terminaali, joka tiedonsiirtolinjan kautta yhdistetään esimerkiksi modeemiin. Modeemista käytetään standardin mukaisesti nimitystä DCE. [13]

Kuvassa 3.1 on esitettyä DTE:n ja DCE:n välinen kytkentä, jossa DTE on tietokone ja DCE on modeemi. Kuvassa tietokone on kytketty modeemin kautta puhelinverkkoon. [12] Standardin mukaisesti DTE-laitteessa käytetään urospuolista (Male D-25) ja DCE-laitteessa naaraspuolista (Female D-25) D-liitintä. [9]





**Kuva 3.1.** RS-232-standardin määrittelemä DTE- ja DCE-laitteen välinen kytkentä. [14]

RS-232-C-standardi suosittelee käytettäväksi rajapintaliittimiä 9- tai 25-nastaisia D-liittimiä. 9-nastaisesta D-liittimestä käytetään nimeä D-9 ja 25-nastainen D-liitin on nimeltään D-25. D-9-liittimestä käytetään liittimen yhdeksästä nastasta 6–9 nastaa tiedonsiirtoon sekä maapotentiaaliin. Vastaavasti D-25-liittintä käytettäessä laitteiden väliseen kommunikointiin käytetään 22–25 nastaa. Taulukkoon 3.1 on koottu RS-232-C-standardin signaalilinjoiden nimitykset käytettäessä D-9- ja D-25-liittimiä. Käytössä olevat signaalit ja nastajärjestys määräytyvät käytetyn liittimen mukaisesti. [4]

**Taulukko 3.1.** RS-232-C-standardin mukaiset signaalit ja nastajärjestys D-9- ja D-25-liittimissä. [4]

Liitin		Kuvaus	Käytetty lyhenne	Signaalin suunta
D-9	D-25			
	1	Suojamaa	PG	-
3	2	Lähtevä data (TX)	TXD	DTE → DCE
2	3	Tuleva data (RX)	RXD	DTE ← DCE
7	4	Lähetyspyyntö	RTS	DTE → DCE
8	5	Valmis lähetykseen	CTS	DTE ← DCE
6	6	Modeemi toimintavalmis	DSR	DTE ← DCE
5	7	Signaalimaa	GND	-
1	8	Signaalin ilmaisin	DCD	DTE ← DCE
4	20	Pääte toimintavalmis	DTR	DTE → DCE
9	22	Kutsun ilmaisin	RI	DTE ← DCE

TXD- ja RXD-linjoja käytetään datan lähettämiseen ja vastaanottamiseen. TXD-linjalla datan suunta on DTE:ltä DCE:lle ja RXD-linjalla DCE:ltä DTE:lle. RTS-linjalla DTE ilmoittaa DCE:lle olevansa valmis lähettämään dataa. Kun DCE on valmis vastaanottamaan dataa, ilmoittaa se siitä CTS-linjalla DTE:lle. DTR- ja DSR-linjoja käytetään ilmoittamaan DTE- ja DCE-laitteiden tilaa. DTE voi esimerkiksi DTR-linjalla ilmoittaa käynnistyneensä tai vaativansa kommunikointilinjan avaamista DCE:n kautta.

DSR-linjalla DCE kertoo olevansa valmis vastaanottamaan komentoja tai dataa. RI-linjan signaali lähetetään DCE:ltä DTE:lle ja signaalilla ilmoitetaan puhelinlinjan soivan. DCD-linjalla ilmaistaan DCE-laitteen muodostaneen yhteyden toiselle DCE-laitteelle. [3] Kuvassa 3.2 on esitetty sarjamuotoisessa tiedonsiirrossa käytetty D-9-liitin.

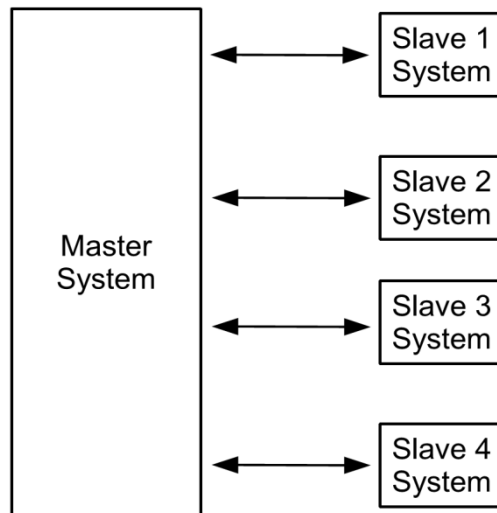


**Kuva 3.2.** RS-232-C-standardin suosittelema urospuolinen D-9-liitin DTE:n ja DCE:n väliseen tiedonsiirtoon. [15]

### 3.1.2 Toiminta

Yksinkertaisimmillaan RS-232-tiedonsiirto vaatii toimiakseen vain kolme johdinta; yksi johdin on tiedon lähettämiseen tietokoneelta modeemille, toinen on tiedon vastaanottamiseen modeemilta tietokoneelle. Signaalilinjojen lisäksi on vielä kolmas, vertailupotentiaalina toimiva maajohdin. [3]

RS-232-standardin tiedonsiirto on balansoimatonta. RS-232-verkkoon voidaan kerrallaan liittää vain yksi vastaanotin ja lähetin, sillä RS-232-verkon laitteet toimivat point-to-point periaatteella. [12] Point-to-point periaatteella tarkoitetaan kahden laitteen välistä tiedonsiirtoa, jossa pääjärjestelmältä (Master System) löytyy jokaiselle eri alijärjestelmälle (Slave System) oma tiedonsiirtolinjansa ja porttinsa. Point-to-point tiedonsiirron periaate on esitettynä kuvassa 3.3. [3]



**Kuva 3.3.** Point-to-point tiedonsiirron periaate. [3]

RS-232-standardissa datasiinaalien loogisen tilan "1" määrittävä jännite on  $-3\text{ V} \dots -25\text{ V}$ . Vastaavasti loogisen tilan "0" määrittävä jännite on  $3\text{ V} \dots 25\text{ V}$ . Tyypillisesti jännitteiden arvot ovat  $\pm 12\text{ V}$ . Loogiselta tilaltaan määrittelemätön jännite on  $-3\text{ V} \dots 3\text{ V}$ . [9]

Standardin määrittelemät jännitteet voidaan jaotella tarkemmin lähettimen ja vastaanottimen kesken. Lähettimen tuottamat jännitteet ovat tasoltaan  $-5\text{ V} \dots -25\text{ V}$  ja  $5\text{ V} \dots 25\text{ V}$ . Vastaavasti vastaanottimen hyväksymät jännitteet ovat  $-3\text{ V} \dots -25\text{ V}$  ja  $3\text{ V} \dots 25\text{ V}$ . Jännite-erot lähettimen ja vastaanottimen välillä johtuvat signaalilinjalla tapahtuvasta jännitehäviöstä. RS-232-standardin datasiinaaleihin verrattuna kontrollisignaaleiden polariteetit ovat päinvastaiset. Kontrollisignaaleilla looginen tila "1" saadaan positiivisella jännitteellä, kun vastaavasti looginen tila "0" saadaan negatiivisella jännitteellä. [7] Lähettimen ja vastaanottimen RS-232-standardin mukaiset jännitetasot on koottu taulukkoon 3.2.

**Taulukko 3.2.** RS-232-standardin mukaiset datasiinaalien ja kontrollisignaalien jännitetasot. [7]

	0	1
Datasiinaalit, lähetin	$5\text{ V} \dots 25\text{ V}$	$-5\text{ V} \dots -25\text{ V}$
Datasiinaalit, vastaanotin	$3\text{ V} \dots 25\text{ V}$	$-3\text{ V} \dots -25\text{ V}$
Kontrollisignaalit, lähetin	$-5\text{ V} \dots -25\text{ V}$	$5\text{ V} \dots 25\text{ V}$
Kontrollisignaalit, vastaanotin	$-3\text{ V} \dots -25\text{ V}$	$3\text{ V} \dots 25\text{ V}$

RS-232-standardi on yksi maailmalla laajimmin käytetyistä sarjaliikennestandardeista sen yksinkertaisuuden ja luotettavuuden vuoksi. Vielä nykypäivänäkin uusien entistä nopeampien tiedonsiirtostandardien vallatessa alaa, löytyy RS-232 rajapintana monista laitteista. RS-232-standardi on edelleen käytössä

niin teollisuudessa kuin kaupallisissa laitteista juuri sen yksinkertaisuuden, edullisuuden ja toimintavarmuuden vuoksi. [3, 12]

RS-232-standardista on julkaistu useita versioita, joista viimeisin käytössä oleva versio on vuonna 1997 julkaistu RS-232-F. [4] Standardista käytettävä virallinen nimi on vaihdellut sitä sponsoroivan organisaation mukana. RS-232-standardi tunnetaan myös nimillä EIA RS-232, EIA 232 sekä viimeisimpänä TIA 232. [16]

RS-232-standardin heikkouksina on lyhyt, maksimissaan 15 metrin tiedonsiirtoetäisyys, useimmille sovelluksille liian hidas tiedonsiirtonopeus 20 kbit/s, laitteiden toiminta vain point-to-point periaatteella sekä käytössä olevat jännitetasot. Käytännössä standardista poiketen voidaan huomattavasti suurempia tiedonsiirtonopeuksia käyttää lyhyemmillä tiedonsiirtoetäisyyksillä. RS-232:n heikkoudet eivät johdu standardissa olevista virheistä vaan muuttuneista ja kehittyneemmistä toimintaympäristöistä. RS-232-standardin lisäksi on julkaistu RS-422- ja RS-485-standardit, jotka tarjoavat parannuksia muun muassa käytettävissä olevaan tiedonsiirtoetäisyyteen ja nopeuteen. [17]

### 3.1.3 Kättelysignaalit

RS-232-standardin määrittelemät signaalilinjat voidaan jakaa neljään eri ryhmään: Data-, ohjaus-, ajoitus- ja toissijaisiin signaalilinjoihin. Datan lähetyssuunta on standardin mukaisesti DTE:ltä DCE:lle, ja signaalilinjojen tehtävänä on siirtää dataa näiden kahden laitteen välillä. Ohjaussignaaleiden tehtävänä on laitteiden välinen kättely sekä hallita datan liikkumista laitteiden rajapintojen välillä. [17]

RS-232-standardia ei kuitenkaan noudateta tarkasti, vaan laitevalmistajat soveltavat standardia omiin tarpeisiinsa sopivaksi, koska jokainen laite ei tarvitse kaikkia standardin mukaisia toimintoja. Esimerkiksi modeemit vaativat toimiakseen useampia ohjaussignaaleja kuin sarjaporttiin liitettävä hiiri. Datansiirrossa ohjaus- eli kättelysignaalit voidaan toteuttaa joko laitteistolla tai ohjelmallisesti, minkä lisäksi voidaan olla käyttämättä kokonaan kättelysignaaleja. [9]

Kun kättelysignaaleja ei käytetä, täytyy vastaanottajan ehtiä lukemaan lähetetty data ennen kuin lähettäjä lähettää uutta dataa. Laitteistolla toteutettu kättely voidaan toteuttaa niin, että lähettäjä kysyy vastaanottajalta, onko se valmiina vastaanottamaan dataa. Jos vastaanottaja on valmis, kertoo se tästä lähettäjälle. Kun data on lähetetty lähettäjältä vastaanottajalle, informoi vastaanottaja lähettäjälle, että uutta dataa ei voida lähettää ennen kuin viimeksi vastaanotettu data on luettu vastaanottopuskurista. RS-232-standardin kättelysignaaleja ovat CTS-, RTS-, DTR- ja DSR-signaalit. [9]

## 3.2 RS-422

1970-luvulla RS-422-standardi kehitettiin tarjoamaan kehittyneempi tiedonsiirtorajapinta RS-232-standardiin verrattuna. Tärkeimmät parannukset olivat tiedonsiirtonopeuden kasvattaminen, suurempi tiedonsiirtoetäisyys ja häiriönsietokyvyn kasvaminen. [13]

RS-422-standardissa tiedonsiirto tapahtuu differentiaalisesti. Differentiaalisella tiedonsiirrolla saavutetaan parempi kohina ja häiriönsietokyky verrattuna balansoimattomaan tiedonsiirtolinjaan. Differentiaalinen tiedonsiirto mahdollistaa tällöin suuremmat tiedonsiirtonopeudet. [13] RS-422-standardissa loogisen tilan "1" määrittävä differentiaalinen jännite-ero lähettimen johtimien A ja B välillä on  $-2\text{ V} \dots -6\text{ V}$ . Vastaavasti loogisen tilan "0" määrittävä differentiaalinen jännite-ero on  $2\text{ V} \dots 6\text{ V}$ . Kirjallisista lähteistä riippuen linjoista A ja B käytetään myös merkintöjä A(-) ja B(+), sekä TX+ ja TX-. [7]

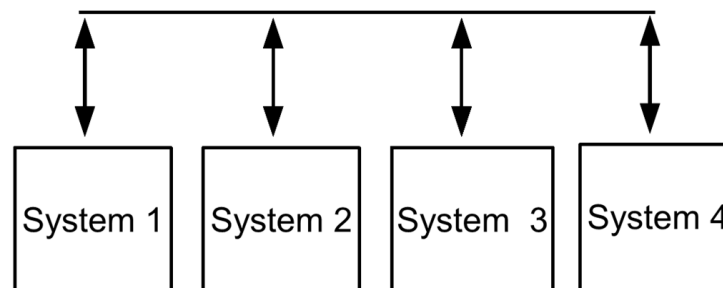
RS-422-tiedonsiirto voi tapahtua half- tai full-duplex-muotoisesti. Half-duplex-tyyppisessä tiedonsiirrossa tiedonsiirto tapahtuu yhtä differentiaalista linjaa pitkin. Full-duplex-tyyppinen tiedonsiirto tarvitsee vastaavasti kaksi differentiaalista linjaa, jolloin johtimia tarvitaan maapotentiaalini lisäksi neljä. [17]

RS-232-standardiin verrattuna parannuksia olivat 10 Mbit/s tiedonsiirtonopeus maksimissaan kuusi metriä pitkällä johtimilla sekä 100 kbit/s tiedonsiirtonopeus aina 1200 metriin sakka [17]. Laitteet toimivat lisäksi multi-point-periaatteella, jossa yhteen väylään voi kerralla olla liittyneenä maksimissaan yksi lähettäjä ja 10 vastaanottajaa. [12]

### 3.3 RS-485

RS-485-standardissa tiedonsiirto tapahtuu RS-422-standardin tavoin differentiaalisesti, mutta RS-422-standardiin verrattuna sillä on mahdollista rakentaa todellinen multi-point-tiedonsiirtojärjestelmä. Multi-point-tiedonsiirtojärjestelmässä väylässä olevat laitteet voivat toimia sekä lähettäjinä että vastaanottajina. RS-485-standardi mahdollistaa 32 lähettimen ja vastaanottimen kytkemisen samaan väylään. [12]

Point-to-point-järjestelmään verrattuna multi-point-järjestelmässä jokainen laite on yhteydessä toisiinsa yhden linjan kautta, ja ne muodostavat tiedonsiirtoverkon, jolloin jokainen laite voi lähettää dataa mille tahansa muulle samassa verkossa olevalle laitteelle. Multi-point-järjestelmän etuna on kustannustehokkuus verrattuna järjestelmiin, joissa on käytetty useampia kommunikointilinjoja. Haittana ovat kompleksisempi rajapinta sekä monimutkaisempi kommunikointiprotokolla linjalla olevien laitteiden tunnistamiseen. [3] Multi-point-järjestelmän periaate on esitettyä kuvassa 3.4.



**Kuva 3.4.** Multi-point-järjestelmä. [3]

RS-485-standardi määrittää yhteismuotoiseksi jännitealueeksi -7 V ... 12 V. Standardin mukaisesti differentiaalisen linjan johtimia merkitään kirjaimilla A ja B. Johdin A on invertoiva ja johdin B ei-invertoiva tulo. Differentiaali-jännitteet voidaan esittää kuvan 2.7 mukaan seuraavasti: Loogisen tilan "1" määrittävä differentiaalinen jännite-ero lähettimen johtimien A ja B välillä on -1,5 V ... -6 V. Vastaavasti loogisen tilan "0" määrittävä differentiaalinen jännite-ero on 1,5 V ... 6 V. A-johtimesta vaihtoehtoisesti käytetään myös merkintöjä A-, TxA ja Tx+. Vastaavasti B-johtimesta käytetään lisäksi merkintöjä B+, TxB ja Tx-. [17]

Vastaanotetun signaalin loogisen tason määrittämiseen riittää kuvassa 2.7 määriteltyjen linjojen A ja B välinen 0,2 V:n suuruinen jännite-ero. RS-485-standardi sallii lähettimen ja vastaanottimen välillä 1,3 V:n suuruisen kohinamarginaalin, jonka verran signaaliin voi summautua kohinaa tai signaali voi vaimentua. RS-232-standardiin verrattuna RS-485-standardin kohinamarginaalit ovat lähettimen ja vastaanottimen välillä pienempiä, mutta differentiaalisen tiedonsiirtolinjan vuoksi linjassa esiintyvien häiriöiden eliminoiminen on tehokasta. Kohinamarginaalit kasvavat, kun käytetään suurempaa kuin standardin määrittämää minimijännitettä 1,5 V. RS-485-standardin suurin tiedonsiirtonopeus 10 Mbit/s voidaan saavuttaa alle 10 metrin tiedonsiirtoetäisyyksillä. Suurin tiedonsiirtoetäisyys 1200 metriä on mahdollista nopeudella 100 kbit/s. Käytettävissä olevaan nopeuteen vaikuttaa laitteiden välillä käytetyn kaapelin pituus. [18] RS-232-, RS-422- ja RS-485-standardien ominaisuudet on koottu taulukkoon 3.3.

**Taulukko 3.3.** Tiedonsiirtostandardien vertailu. [9]

	<b>RS-232</b>	<b>RS-422</b>	<b>RS-485</b>
Tiedonsiirtotapa	Full-duplex	Full-duplex Half-duplex	Half-duplex
Max. Bittinopeus	20 kbit/s	10 Mbit/s	10 Mbit/s
Max. Tiedonsiirtoetäisyys	15 m	1200 m	1200 m
Toimintatapa	Balansoimaton	Differentiaalinen, Balansoitu	Differentiaalinen, Balansoitu
Laitteiden lukumäärä	1 lähetin 1 vastaanotin	1 lähetin 10 vastaanotinta	32 lähetintä 32 vastaanotinta
Lähettimen jännite	5 V ... 25 V, -5 V ... 25 V	2 V ... 6 V, -2 V ... -6 V	1,5 V ... 6 V, -1,5 V ... 6 V

### 3.4 USB

USB-sarjaväyläarkkitehtuuri on tuttu monista nykyajan laitteista. Esimerkiksi tietokoneen oheislaitteet, kuten hiiri, näppäimistö ja printterit liitetään tietokoneeseen USB-portin kautta. USB-standardin mukainen tiedonsiirto tapahtuu isäntä-orja-periaatteen mukaisesti. Isäntälaitte (PC) huolehtii yhteyksien luomisesta isäntä- ja orjalaitteiden välillä. Orjalaitte ei voi muodostaa USB-yhteyttä. [19]

Ensimmäinen USB-standardi USB 1.0 julkaistiin vuonna 1996, ja se on näihin päiviin saakka pysynyt keskeisiltä ominaisuuksiltaan samanlaisena. Merkittävimmät muutokset ovat tapahtuneet käytettävissä olevaan tiedonsiirtonopeuteen, tehonkulutukseen ja tuettavien laiteluokkien määrään. Uusin käytössä oleva USB-standardi on marraskuussa 2008 julkaistu USB 3.0. Laitteiden väliseen liityntään käytetään neljän johtimen linjaa, jossa kaksi johdinta muodostaa differentiaalisen tiedonsiirtolinjan ja loput johtimet maapotentiaalin ja käyttöjännitteen. [20]

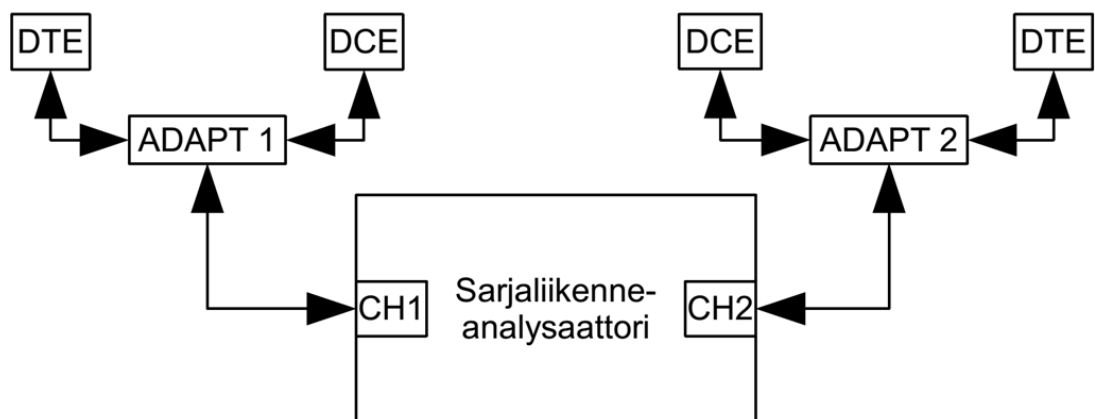
USB tukee neljää eri tiedonsiirtonopeutta: SuperSpeed (5 Gbit/s), high speed (480 Mbit/s), full speed (12 Mbit/s) ja low speed (1.5 Mbit/s). SuperSpeed-nopeuden saavuttamiseksi tarvitaan USB 3.0-standardia tukeva isäntä- ja orjalaitte. Sovelluksen datan lisäksi väylällä lähetetään kontrolli- ja statussignaaleja sekä virheentarkistustietoa, jolloin datan siirtonopeus on pienempi kuin väylän teoreettinen siirtonopeus. USB-protokollan mukaiset oletusarvoiset datansiirtonopeudet ovat SuperSpeed-nopeudelle 400 MB/s, high speed-nopeudelle 53 MB/s, full speed-nopeudelle 1,2 MB/s ja low speed-nopeudelle 800 B/s. Lisäksi nopeuteen vaikuttavat laitteiston ja ohjelmiston asettamat rajoitukset. USB-portista saatava nimellisjännite on 5 V, mutta käytännössä jännite on 4,45 V ... 5,25 V. [20]

## 4 SOVELLUKSIA SARJALIIKENNEANALYSAATTORILLE

Tässä luvussa esitellään sarjaliikenneanalaysaattorille soveltuvia käyttökohteita sekä tutustutaan kaupallisesti tarjolla oleviin laitteisiin, joilla pystytään mittaamaan TTL- (Transistor-Transistor Logic) ja CMOS-tasoisia (Complementary Metal Oxide Semiconductor) sekä RS-232-, RS-422- ja RS-485-standardien mukaisia signaaleja.

### 4.1 Käyttökohteet

Sarjaliikenneanalaysaattorille soveltuva käyttökohde on esimerkiksi virheiden etsiminen kahden laitteen välisestä dataliikenteestä. Sarjaliikenneanalaysaattorilla todetaan helposti esimerkiksi yhteen kanavaan kytkettyjen laitteiden mahdolliset ajoitusongelmat, joissa laitteet lähettävät dataa liian suurella nopeudella. Tällöin laitteet eivät ehdi reagoimaan lähetettyyn dataan. Liian suuri lähetyksenopeus saattaa aiheuttaa vastaanottavassa laitteessa ylivuodon, jolloin osa datasta menetetään. Vastaavasti sarjaliikenneanalaysaattorin kanaviin voidaan kytkeä kuvan 4.1 mukaisesti kaksi laiteparia, jolloin tutkitaan näiden kahden laiteparin välisiä ajoituksia. Kolmas esimerkki käyttökohteesta on virheellinen kommunikointi kahden laitteen tai kahden laiteparin välillä. Sarjaliikenneanalaysaattorilla havaitaan tehokkaasti nämä virheet, jolloin ongelman lähde voidaan helposti paikallistaa ja korjata. Virheellisestä kommunikoinnista aiheutuvat ongelmat saattavat johtua ohjelmistossa olevasta virheestä, johon kommunikointitilanteissa reagoidaan virheellisellä datalla. Kuvassa 4.1 ADAPT 1 ja ADAPT 2 ovat mittausadapttereita, joilla kaapataan DTE:n ja DCE:n välisen dataliikenteen signaalit sarjaliikenneanalaysaattorille välitettäväksi.



**Kuva 4.1.** Sarjaliikenneanalaysaattorin toimintaperiaate.



## 4.2 Kaupalliset laitteet

Kaupallisia sarjaliikenneanalysaattoreita on tarjolla usealta eri valmistajalta. Niillä pystytään laitteesta riippuen analysoimaan hyvin erilaisia standardeja ja tiedonsiirtoprotokollia. Seuraavassa on esitelty kahden eri valmistajan, LINEEYE CO., LTD:n ja IFTOOLS GmbH:n, valmistamat signaalianalysaattorit sarjamuotoisen tiedonsiirron analysointiin. Laitteiden ominaisuuksista on esitelty ne, jotka ovat kiinnostavia oman sarjaliikenneanalysaattorin suunnittelun kannalta.

### 4.2.1 Multi Protocol Analyzer LE-8200-E

Multi Protocol Analyzer LE-8200-E on LINEEYE CO., LTD:n valmistama analysaattori, jolla pystytään analysoimaan RS-232-, RS-422- ja RS-485-standardien signaaleja. Laitteella on mahdollista myös analysoida siihen liitettävien lisäosien avulla TTL-, I<sup>2</sup>C-, SPI-, CAN- ja USB-signaaleja. Laitteen asettaminen toimintakuntoon ja tulosten analysointi tapahtuu laitteessa olevan 5,7 tuuman näytön kautta. Laitteessa on 100 MB:n sisäinen muisti sekä ulkoinen muisti, joka on laajennettavissa muistikortin avulla aina 32 GB:n suuruiseksi. Laite voidaan asettaa tallentamaan dataa niin kauan kunnes muisti on täysi tai jatkuva-aikaisesti rengaspuskuriin. Jokaista kaapattua tavua kohden laite kuluttaa neljä tavua muistia. [21]

Laitteessa on yksi kanava, jolla voidaan monitoroida yhden laiteparin välistä tiedonsiirtoa. Laitteen maksimitiedonsiirtonopeus full-duplex-tiedonsiirtoperiaatteella on 2,150 Mbit/s ja half-duplex-tiedonsiirtoperiaatteella 4,0 Mbit/s. Tiedonsiirtonopeus voidaan asettaa 50 bit/s – 4,0 Mbit/s välille. Analysoitava tavun koko saa olla 5–8 bittiä, ja tavulle voidaan asettaa pariteetti, sekä 1–2 stop-bittiä. Laitepari kytketään laitteeseen D-25-liittimen kautta. LE-8200-E Multi Protocol Analyzer on esitetty kuvassa 4.2. [21]



*Kuva 4.2. LINEEYE CO., LTD:n valmistama Multi Protocol Analyzer. [21]*

#### 4.2.2 MSB-RS232 ja MSB-RS485

IFTOOLS GmbH valmistaa sarjaliikenneanalysaattoreita kahden eri sarjaliikennestandardin analysointiin. RS-232-standardin signaaleja voidaan analysoida laitteella MSB-RS232. RS-422- ja RS-485-standardin signaalien analysointia varten on MSB-RS485-laite. MSB-RS232 ja MSB-RS485 pystyvät analysoimaan signaaleja yhden mikrosekunnin tarkkuudella riippumatta käytössä olevasta PC:stä ja käyttöjärjestelmästä. [22]

MSB-RS232-sarjaliikenneanalysaattorilla pystytään analysoimaan kahdeksaa eri RS-232-standardin signaalia. TXD- ja RXD-linjojen bittinopeudet voidaan asettaa sekä manuaalisesti että automaattisesti 1 bit/s – 1 Mbit/s nopeudelle. TXD- ja RXD-linjojen datapakettien koko saa olla enintään 5–9 bittiä, sekä niille voidaan asettaa pariteetti. MSB-RS232-laitteen sallimat jännitetasot ovat RS-232-standardin mukaisesti 3 V ... -25 V ja 3 V ... 25 V. Laitteessa on kaksi D-9-liitintä, joihin tutkittava laitepari kytketään. Sarjaliikenneanalysaattori saa käyttöjännitteensä USB-portista. Signaalien analysointiin käytetään PC:llä ajettavaa ohjelmistoa, joka tarjoaa kattavan määrän työkaluja signaalien analysointiin ja tutkimiseen. [23]

MSB-RS485-laitteella pystytään mittaamaan ja analysoimaan RS-422- ja RS-485-standardien signaaleja. Laitteella pystytään mittamaan RS-422-standardin full-duplex-tyyppisen tiedonsiirron lähetys- ja vastaanottolinjoja sekä RS-485-standardin half-duplex-tyyppisen tiedonsiirron lähetys- ja vastaanottolinjaa. Jos RS-485-standardista on käytössä full-duplex-tyyppinen tiedonsiirto, voidaan mitata lähetys- ja vastaanottolinjoja. MSB-RS485-laitteelle voidaan asettaa analysoitavan tavun kooksi 9 bittiä, ja siinä on lisäksi automaattinen bittinopeuden ja tiedonsiirtoprotokollan tunnistus. Bittinopeus voidaan asettaa 1 bit/s – 1 Mbit/s nopeudelle. Laitteen sallitut signaalien jännitetasot ovat -0,2 V ... -12 V ja 0,2 V ... 12 V. Kuvassa 4.3 on esitetty MSB-RS485-sarjaliikenneanalysaattori. [24]



**Kuva 4.3.** IFTOOLS GmbH:n valmistama sarjaliikenneanalysaattori MSB-RS485. [25]

Yhdellä MSB-RS232- tai MSB-RS485-laitteella pystytään monitoroimaan kerralla yhden laiteparin välistä tietoliikennettä. Kahden laiteparin välinen samanaikainen mittaaminen on mahdollista kytkemällä kaksi sarjaliikenneanalysaattoria yhteen. Laitteissa on RJ-45-liitin, jonka kautta kaksi sarjaliikenneanalysaattoria saadaan liitettyä ja keskenään tahdistettua. Mittaus voidaan käynnistää alkamaan samanaikaisesti molemmista laitteista PC-ohjelman kautta. [23, 24]

## 5 SARJALIIKENNEANALYSAATTORIN SUUNNITTELU

Tässä luvussa käydään läpi sarjaliikenneanalysaattorin toiminnalle ja suunnittelulle asetettuja vaatimuksia sekä sarjaliikenneanalysaattorin kytkentäkaavion ja piirilevyn suunnittelu. Luvussa kerrotaan lisäksi laitteen komponenttivalinnoista sekä keskeisimmistä suunnitteluratkaisuista. Kytkentäkaavion ja piirilevyn suunnittelussa käytettiin Mentor Graphics:n PADS Logic ja PADS Layout ohjelmistojen versioita 9.4.

### 5.1 Vaatimukset

Toteutettavassa sarjaliikenneanalysaattorissa on kaksi kanavaa, joilla voidaan samanaikaisesti kaapata kahden laiteparin välisen dataliikenteen signaalit. Sarjaliikenneanalysaattorilla kaapattujen viestien analysointi tapahtuu ajallisesti kohdakkain PC:llä suoritettavalla ohjelmalla, jolla myös asetetaan sarjaliikenneanalysaattorin mittaasetukset. Useampi sarjaliikenneanalysaattori on mahdollista tahdistaa keskenään silloinkin, kun laitteet sijaitsevat fyysisesti eri paikassa. Lisäksi sarjaliikenneanalysaattorin laitteisto on toteutettu siten, että sillä on valmius lähettää eri sarjaliikennestandardien sanomia. Suunniteltavalle laitteelle annetut toiminnalliset ja fyysiset vaatimukset on listattu alla.

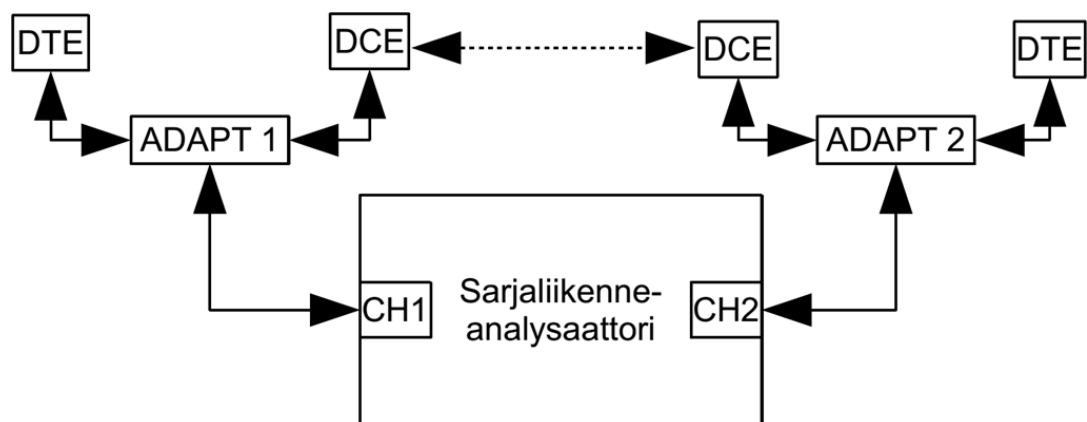
- Käyttöjännite USB 5,0 V
- Kaksi kanavaa
- Laitteen kestettävä  $\pm 30$  V:n jännitteet
- Piirilevy komponentteineen tulee mahtua kooltaan 120x103x30,5 mm koteloon
- Laitteen tulee pystyä käsittelemään seuraavia signaalitasoja ja standardeja:
  - TTL/CMOS
  - RS-232
  - RS-422
  - RS-485
- Säädetty kynnystaso 0,5 V ... 5,0 V CMOS/TTL-tasoisille ja RS-232-standardin signaaleille
- Signaalien vastaanottaminen bittinopeudella 115200 bit/s
- CMOS/TTL-tasoisien ja RS-232-standardin signaalien polariteetin valinta
- Lähetettävien sanomien generointi RS-232-, RS-422-, RS-485-standardeilla
- Useamman sarjaliikenneanalysaattorin tahdistaminen, kun laitteet sijaitsevat fyysisesti toisiaan lähellä sekä eri paikoissa

- DTE:n ja DCE:n välisen tietoliikenteen ilmaiseminen ledeillä
- PC-käyttöliittymä
  - Signaalien analysoiminen
  - Laitteen asetuksien asettaminen
  - Ohjelmiston tulee toimia Linux-ympäristössä

## 5.2 Kytkentäkaavion suunnittelu

Sarjaliikenneanalaysaattori sisältää kaksi kanavaa, joihin kumpaankin kytketään yhden tutkittavan DTE- ja DCE-laiteparin välisen dataliikenteen signaalit. Signaalit kaapataan mittausadapterilla, joka dataliikennettä häiritsemättä välittää signaalit sarjaliikenneanalaysaattorille. DTE ja DCE kytketään suoraan mittausadapteriin, jolloin mittausadapteri huolehtii signaalien välittämisestä DTE:n ja DCE:n välillä sekä kaappaa signaalit sarjaliikenneanalaysaattorille. Sarjaliikenneanalaysaattorin kahden kanavan mittaus mahdollistaa esimerkiksi kahden radiomodeemin välisen dataliikenteen analysoimisen.

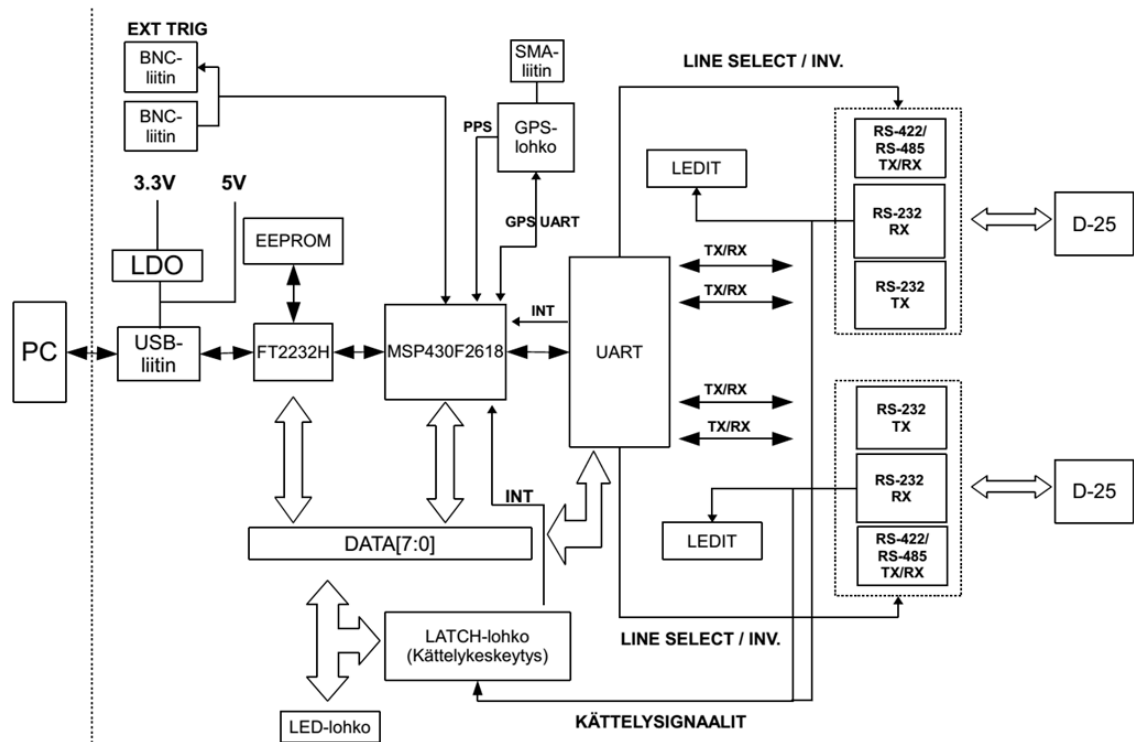
Sarjaliikenneanalaysaattorin toimintaperiaate on esitetty kuvassa 5.1. Kuvassa sarjaliikenneanalaysaattorin kanaviin CH1 ja CH2 on kytketty tutkittavan laiteparin välisen dataliikenteen signaalit mittausadapterien ADAPT 1 ja ADAPT 2 kautta. Mittausadapterin suunnittelusta ja toteutuksesta on kerrottu tarkemmin luvussa 5.2.1.



**Kuva 5.1.** Sarjaliikenneanalaysaattorin kahden kanavan mittauksella voidaan tutkia esimerkiksi kahden radiomodeemin välisen dataliikenteen signaaleja.

Sarjaliikenneanalaysaattorin lohkokaavio on esitetty kuvassa 5.2. Laitteen ulkopuoliset liitännät ovat kaksi D-25-liitintä, kaksi BNC-liitintä, SMA-liitin sekä USB-liitin. D-25-liittimet ovat sarjaliikenneanalaysaattorin liitettäviä kahta laiteparia varten. BNC-liittimet ovat laitteen ulkoiseen tahdistukseen, jolloin useampi sarjaliikenneanalaysaattori voidaan tahdistaa keskenään samalla signaalilla. USB-liitännästä laite saa käyttöjännitteensä sekä kommunikoi PC-ohjelmiston kanssa.

Laitteessa on lisäksi SMA-liitin, johon kiinnitetään antenni GPS-signaalin (Global Positioning System) vastaanottamista varten.



**Kuva 5.2.** Sarjaliikenneanalyysoijan lohkokaavio.

Sarjaliikenneanalyysoitsijan kummassakin kanavassa on tasonmuuntimet RS-232-, RS-422- ja RS-485-standardien signaaleille. RS-232-standardin signaalien vastaanottamiseen (RS-232 RX) ja generoimiseen (RS-232 TX) on oma lohko kummassakin sarjaliikenneanalyysoitsijan kanavassa. RS-232-tasonmuuntimilla vastaanotetaan lisäksi TTL/CMOS-tasoiset signaalit. RS-422- ja RS-485-standardien signaalien vastaanottaminen ja generoiminen (RS-422/RS-485 TX/RX) toteutetaan samassa lohkossa. Tässä signaalien vastaanottamisella tarkoitetaan tutkittavan dataliikenteen kaikkien signaalien kaappaamista ja signaalien generoimisella sarjaliikenneanalyysoitsijalla tuotettujen signaalien välittämistä tutkittaville laitteille.

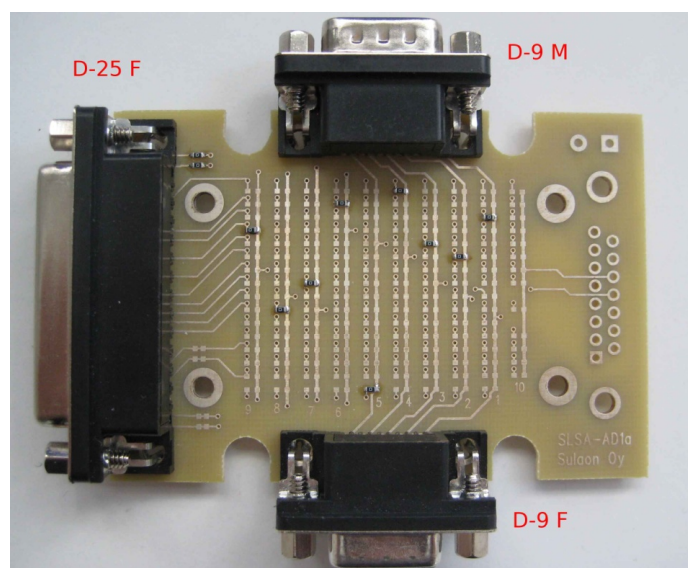
Kanavan tasonmuunnin valitaan LINE SELECT- valintasignaalilla, joka määrää, minkä standardin taseisia signaaleja ollaan mittaamassa. RS-232-standardin kättelysignaalien ilmaisemiseen on kanavakohtaiset led-lohkot (LEDIT). TTL/CMOS-tasoisten ja RS-232-, RS-422- ja RS-485-standardin signaalien TX- ja RX-signaalilinjoiilla tapahtuva liikenne ilmaistaan mikroprosessorilla ohjatulla LED-lohkolla. LED-lohkon ledit asetetaan väylän kautta, jolloin nopeiden signaalien havaitsemista varten signaaleita on mahdollista keinotekoisesti viivastää. Viivästämisen ansiosta sarjaliikenneanalysointorin käyttäjä ehtii havaita signaalilinjoiilla tapahtuvan liikenteen.

Tasonmuuntimilta tulevat TX/RX-signaalilinjoiden signaalit tallennetaan nelikanavaisella UART:lla (Universal Asynchronous Receiver Transmitter). UART:n kanava aiheuttaa keskeytyksen, kun kanavalle lähetetty tavu on kokonaan vastaanotettu. Jokaisella UART:n kanavalla on oma keskeytysignaali. Vastaanotetun signaalin tarkan aloituskohdan saamiseksi tarvitaan lisäksi tieto vastaanotetun tavun kestoista, jolloin signaalin tarkka aloituskohta voidaan laskea. RS-232-standardin kättelysignaalien tallennus tapahtuu LATCH-lohkolla. Kättelylinjoilla tapahtuvat signaalien muutokset aiheuttavat LATCH-lohkolta keskeytyksen mikroprosessorille, minkä perusteella kättelysignaalien muutosten ajankohta saadaan selville. Sarjaliikenneanalyysointikommuunikoi PC-ohjelman kanssa FT2232H-piirin kautta.

Mikroprosessori MSP430F2618, LATCH-lohko, UART ja FT2232H ovat yhteydessä toisiinsa 8-bittisen väylän kautta. Väylän ansiosta datan siirto mikroprosessorin ja oheiskomponenttien välillä on nopeaa sarjamuotoiseen tiedonsiirtoon verrattuna, jolloin ylimääräistä viivettä ei aiheudu. Tilanteissa, joissa sarjaliikenneanalyysointikommuunikat sijaitsevat toisistaan fyysisesti kaukana, käytetään GPS-vastaanotinta (GPS-lohko) useamman sarjaliikenneanalyysointikommuunikatin tahdistamiseen.

### 5.2.1 Mittausadapteri

Kahden laitteen välisen signaaliliikenteen välittämiseen sarjaliikenneanalyysointikommuunikatille käytetään mittausadapteria. Mittausadapterissa on kaksi D-9-liitintä, D-25-liitin sekä D-15-liitin. Tutkittava laitepari voidaan vaihtoehtoisesti kytkeä D-9-liittimiin tai D-15-liittimeen. Käytettäessä D-15-liitintä laitteet kytketään mittausadapteriin Y-kaapelilla. Y-kaapeli huolehtii signaalien välittämisestä kahden laitteen välillä sekä mahdollistaa laitteiden välisten signaalien välittämisen mittausadapterille. D-9-liittimien välillä signaalit välitetään suoraviivaisesti D-9-liittimeltä toiselle. Mittausadapteri on esitetty kuvassa 5.3.



**Kuva 5.3.** Tutkittavan laiteparin signaalien kaappauksessa käytetty mittausadapteri.

D-25-liitin toimii rajapintana sarjaliikenneanalyysoitsijan ja mittausadapterin välillä. Mittausadapterin signaalilinjat on toteutettu matriisina, jolloin mittausadapterin D-25-liittimen linjoihin voidaan välittää sarjaliikenneanalyysoitsijan D-25-liittimen signaaleja vastaavat mittaus-signaalit tutkittavan laiteparin signaaleista. Mittausadapteriin voidaan liittää laitteita erilaisilla I/O-pinnikonfiguraatioilla, jolloin yksi mittausadapteri riittää kattamaan kaikki mahdolliset variaatiot, joilla signaalit ovat kytkettävissä D-9- ja D-15-liittimiin. Mittausadapterin D-9- ja D-15-liittimien signaalilinjojen yhdistäminen D-25-liittimelle tapahtuu 0  $\Omega$ -vastuksella, jolloin loppukäyttäjä pystyy helposti muuttamaan mittausadapterin omiin tarpeisiinsa sopivaksi.

Sarjaliikenneanalyysoitsija kytketään mittausadapterin naaraspuoliseen D-25-liittimeen (D-25 F). Tutkittavan laiteparin DTE kytketään naaraspuoliseen (D-9 F) ja DCE urospuoliseen D-9-liittimeen (D-9 M). Kuvan 5.3 mittausadapteriin ei ole kytketty D-15-liitintä. D-15-liittimen paikka on mittausadapterin oikealla puolella. Mittausadapterin koko on 100x80 mm.

## 5.3 Komponenttien valinnat

Seuraavassa on esiteltynä laitteen toteutuksessa käytetyt komponentit sekä niiden valintaan vaikuttaneet tekijät.

### 5.3.1 Mikrokontrolleri

Sarjaliikenneanalyysoitsijan mikrokontrolleriksi valittiin Texas Instrumentsin MSP430-mikrokontrolleriperheestä 16-bittinen MSP430F2618. MSP430F2618-mikrokontrolleria löytyy eri versioita, jotka eroavat toisistaan koteloiltaan ja laitteen sisältämien I/O-porttien lukumäärältä. Tässä laitteessa päädyttiin mikrokontrollerin versioon, joka sisälsi suurimman määrän I/O-liitäntöjä eli yhteensä 64 ohjelmoitavaa pinniä. Mikrokontrollerin käyttöjännite on 1,8 V ... 3,6 V, mikä sopii laitteeseen, joka saa käyttöjännitteensä USB-liitännästä. [26]

Mikrokontrollerissa on kaksi 16-bittistä ajastin-lohkoa Timer\_A ja Timer\_B, joissa on tarvittava määrä ajastin/kaappaus-rekistereitä sarjaliikenneanalyysoitsijan tarpeisiin. Timer\_A-lohko sisältää kolme ja Timer\_B-lohko seitsemän ajastin/kaappaus-rekisteriä. Mikrokontrollerissa on 12-bittinen ADC (Analog-to-digital converter) ja kaksikanavainen 12-bittinen DAC (Digital-to-analog converter). Ohjelmamuistia mikrokontrollerissa on 116 kB + 256 B, joka on vähintäänkin riittävä määrä sarjaliikenneanalyysoitsijan ohjelman toteuttamiseen. [26]

Mikrokontrollerilta on valittavissa neljä eri kellotuloa, joista kaksi on ulkoisia ja kaksi sisäisiä. Ulkoisesti mikrokontrolleriin voidaan liittää resonaattori, kellokide tai ulkoinen kellosignaali kellotuloihin LFXT1CLK ja XT2CLK. LFXT1CLK-oskillaattori tukee sekä matalataajuisia 32768 Hz:n että korkeataajuisia 400 kHz:n – 16 MHz:n kellokidettä. Mikrokontrollerin sisäiset kellot ovat digitaalisesti ohjattu oskillaattori DCOCLK sekä matalataajuinen 12 kHz:n taajuudella toimiva VLOCLK. DCOCLK



voidaan asettaa toimimaan 60 KHz:n – 26 MHz:n taajuudella. Kellotuloista generoidaan mikroprosessorin tarvitsemat kellosignaalit MCLK (Master clock), ACLK (Auxiliary clock) ja SMCLK (Sub-main clock). MCLK toimii kellosignaalina CPU:lle (Central Processing Unit) sekä muulle sisäiselle järjestelmälle. MCLK voidaan asettaa toimimaan kellotuloista LFXT1CLK, VLOCLK, XT2CLK tai DCOCLK. ACLK ja SMCLK toimivat kellosignaaleina mikrokontrollerin sisäisille lohkoille, kuten UART:lle ja SPI-väylälle. ACLK voidaan asettaa toimimaan kellotuloista LFXT1CLK tai VLOCLK. SMCLK voidaan asettaa kellotuloista LFXT1CLK, VLOCLK, XT2CLK tai DCOCLK. [27]

Mikrokontrollerin LFXT1CLK-kellosignaali tuodaan ulkoisesta 20 MHz:n lämpötilakompensoidusta Connor Winfield:n DV75C-020.0M TCXO-kideoskillaattorista (Temperature Compensated Crystal Oscillator). TCXO-kideoskillaattoreilla saadaan kompensoinnista johtuen erityisen tarkka kellosignaali olosuhteista riippumatta. Sarjaliikenneanalysaattorissa käytetyn kideoskillaattorin taajuuden vaihtelu  $\pm 0,28$  ppm-arvolla (Parts per million) on maksimissaan  $\pm 5,0$  Hz. [28]

### 5.3.2 Jänniteregulointi

USB-väylän antamasta nimellisestä 5,0 V:n jännitteestä reguloidaan 3,3 V:n käyttöjännite Texas Instrumentsin LDO-lineaariregulaattorilla (low-dropout) TLV70233DBVT. Lineaariregulaattorista virtaa riittää sarjaliikenneanalysaattorin tarpeisiin maksimissaan 300mA. [29]

### 5.3.3 GPS

Sarjaliikenneanalysaattorin tahdistamiseen käytetään Fastraxin IT530 GPS-vastaanotinta. GPS-vastaanottimen avulla saatavaa tahdistusta tarvitaan tilanteissa, joissa tutkittavat laitteet sijaitsevat toisistaan fyysisesti kaukana ja kummankin laitteen signaaleja kaapataan omalla sarjaliikenneanalysaattorilla. GPS-vastaanottimessa on PPS-signaalin (Pulse-per-second) lähtö, jolla saadaan aikaan erittäin täsmällisiä ajoituksia. Tämä tarkoittaa sitä, että GPS-vastaanottimesta tulee tasan sekunnin välein signaali, jota voidaan käyttää sarjaliikenneanalysaattorin tahdistamiseen. PPS-signaalin pulssin pituus on 100 ms ja signaalin muutos tapahtuu 1  $\mu$ s:n tarkkuudella UTC-sekuntiin (Coordinated Universal Time) verrattuna. IT530-moduuli toimii mikroprosessorin tavoin 3,3 V:n jännitteellä ja on erittäin vähän virtaa kuluttava. [30]

GPS-vastaanottimen antennin käyttöjännitettä varten on lisätty oma regulaattori, joka tuottaa antennin vaatiman 4,3 V:n jännitteen. Regulaattorina käytetään Texas Instrumentsin valmistamaa LP2951-regulaattoria, jonka lähtöjännite on asetettavissa ulkoisilla vastuksilla välille 1,24 V ... 30,0 V. [31]

### 5.3.4 FT2232H

Tietokoneen ja sarjaliikenneanalysaattorin välinen kommunikointi tapahtuu FTDI:n FT2232H USB-UART/FIFO-muuntimen (First In, First Out) avulla. FT2232H on

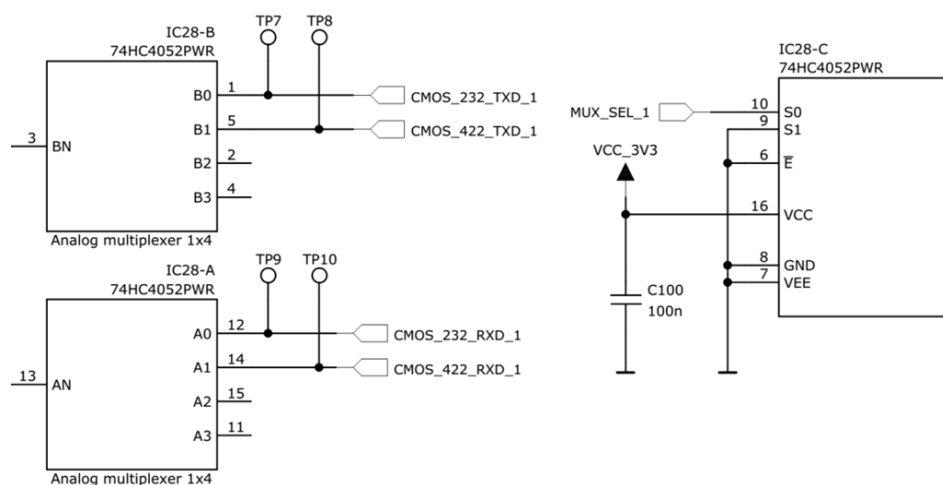
mahdollista asettaa toimimaan monen erilaisen rajapintastandardin mukaan ulkoisesti kytkettävän EEPROM-muistin avulla. FT2232H sisältää kaksi kanavaa, jotka voidaan erikseen asettaa haluttuun toimintatilaan. Oletusarvoisesti ilman EEPROM-muistia FT2232H:n kanavat toimivat asynkronisena RS-232-rajapintana. Tässä laitteessa kanava A on konfiguroitu toimimaan asynkronisena RS-232-rajapintana ja kanava B rinnakkaismuotoisena asynkronisena FT245 FIFO-rajapintana. [32]

Kytettäessä sarjaliikenneanalyysointila USB-väylään näkyy se kahtena sarjaporttina. Sarjaliikenneanalyysointila FT2232H:n toinen kanava välittää vastaanotetut signaalipaketit aikaleimoihin PC-ohjelmalle ja toinen kanava välittää viestejä sarjaliikenneanalyysointilaan tilasta terminaaliohjelmalle. EEPROM-muisti voidaan ohjelmoida USB-väylän kautta FTDI:n MProg-ohjelmaa käyttäen. FT2232H-piiriin kytkettävän EEPROM-muistin on tuettava sekä 16-bittistä sanan leveyttä että 1 Mbit/s tiedonsiirtonopeutta. Sarjaliikenneanalyysointila käyttää Microchip Technologyn valmistamaa EEPROM-muistia 93LC66B, jossa muistia on yhteensä 4 kB (256x16). FT2232H saa kelloa signaalinsa ulkoiselta 12 MHz:n kiteeltä ja toimii 3,3 V:n jännitteellä. [32, 33]

### 5.3.5 Signaalitasen valinta

RS-232- tai RS-422/485-standardin tasonmuuntimilta tulevat signaalit valitaan Texas Instruments:n CD74HC4052PWR-multiplekseilla. Multiplekserissä on kaksi kanavaa, joissa kummassakin on neljä tuloa ja yksi lähtö. Multiplekseita tarvitaan molemmille sarjaliikenneanalyysointilaan kanaville, jotta tasonmuuntimilta tulevista signaaleista saadaan välitettyä eteenpäin ne signaalit, joita ollaan mittaamassa. Multipleksien käyttöjännite on 2 V ... 6 V, joten 3,3 V:n käyttöjännite on riittävä. [34]

Signaalitasen valintaan käytetty multiplekseryhtymä on esitetty kuvassa 5.4. Sarjaliikenneanalyysointilaan kanavan signaalitasoksi voidaan kerralla valita joko CMOS/TTL/RS-232- tai RS-422/485-tasoiset signaalit. Signaalitasen valinta tapahtuu valintasignaaleilla, jota ohjataan nelikanavaisen UART:n kautta.



**Kuva 5.4.** Signaalitasojen valinta ohjataan multipleksereillä.

### 5.3.6 UART

Mitattavien TX- ja RX-signaalien tarkkaan ajoitukseen käytetään NXP Semiconductors:n nelikanavaista SC16C554DBIB64,151-UART:a. UART:n kanavat vastaanottavat dataa tutkittavien laitteiden RX- ja TX-linjoista kummastakin sarjaliikenneanalysaattorin kanavasta. Kun kanavaan tuleva tavu on kokonaan vastaanotettu, aiheuttaa UART jokaisesta kanavasta oman keskeytyssignaalin mikroprosessorille. Keskeytyssignaalia käytetään hyväksi, kun halutaan saada tarkat aikaleimat selville tutkittavien laitteiden RX- ja TX-linjoilla lähetetystä datasta. [35]

UART:lla tallennetaan lisäksi DTR- ja DSR-signaalien sen hetkinen tila UART:n sisäiseen rekisteriin, josta ne voidaan tarvittaessa käydä lukemassa. Kellosignaali tuodaan ulkoisesta 18,432 MHz:n kiteestä, jolla saadaan UART:n sisäisten jakajien avulla tuotettua jokaiselle UART:n kanavalle oikea bittinopeus vastaanotettavaa signaalia varten. [36]

### 5.3.7 ESD

Sarjaliikenneanalysaattorin ulkoisista liittynöistä tulevia signaaleja suojataan NXP Semiconductors:n IP4220CZ6-komponenteilla. IP4220CZ6 antaa suojan  $\pm 8$  kV:n suuruisille varausjännitteille. USB:ltä ja D-25-liittimistä mikrokontrollerille suoraan tulevat signaalit suojataan IP4220CZ6-komponentilla, jotta mahdolliset virhekytkennät eivät riko laitetta. [37]

### 5.3.8 Tasonmuuntimet

Mikroprosessorin I/O-liitännät käyttävät TTL-tasoisia signaaleja, joiden jännitetaso on 0 V ... 3,6 V. Liitettäessä RS-232-, RS-422-, RS-485-standardin tasoisia signaaleja mikroprosessoriin tarvitaan sekä signaalien vastaanottamiseen että lähettämiseen tasonmuuntimia. Tasonmuuntimilla toteutetaan erilaisten rajapintojen vaatimat signaalitasot.

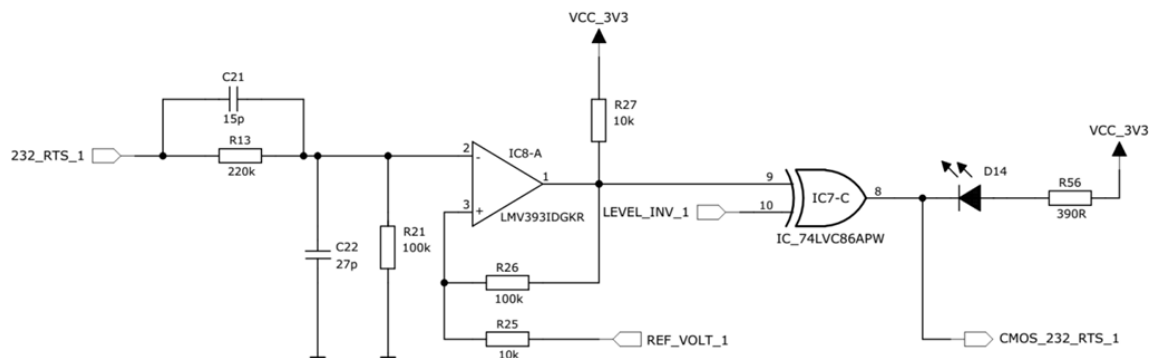
RS-422/485-standardin signaalien lähettämiseen ja vastaanottamiseen käytetään Linear Technologyn valmistamaa lähetin-vastaanotinpiiriä LTC2862-2. Komponentti kestää  $\pm 60$  V:n suuruiset ylijännitteet datalinjoissa sekä sisältää rajapintaliitännöissä ESD-jännitesuojauksen  $\pm 15$  kV:n suuruisille varausjännitteille. LTC2862-2-komponentti on half-duplex-tyyppistä tiedonsiirtoa varten, joten se soveltuu sellaisenaan RS-422/485-standardin signaalien lähettämiseen ja vastaanottamiseen. Full-duplex-tyyppisessä tiedonsiirrossa jokaista sarjaliikenneanalysaattorin kanavaa varten tarvitaan kaksi LTC2862-2-komponenttia. [38]

RS-232-standardin signaalien lähettämiseen käytetään valmista Texas Instrumentsin lähetin-vastaanotinpiiriä MAX3243E, jossa RS-232-standardin signaalien vastaanottamiseen on viisi ja lähettämiseen kolme kanavaa. MAX3243E:ssä ei ole mahdollista säätää vastaanotettavan signaalin kynnysjännitettä, minkä takia signaalien vastaanottaminen on toteutettu erikseen komparaattorikytkennällä. MAX3243E-lähetin-

vastaanotinpiiriin lähettimen kolmea kanavaa käytetään TXD-signaalin lisäksi DTR- ja RTS-signaaleille. [39]

CMOS/TTL-tasoisten ja RS-232-standardin signaalien vastaanottamiseen ei käytetä mitään valmista komponenttia vaan niiden vastaanottaminen on toteutettu komparaattorikytkennällä. Kytkennällä saadaan toteutettua säädettävä kynnysjännite RS-232-standardia sekä CMOS/TTL-tasoisia signaaleita varten. Kytkennässä komparaattorin lähdössä on XOR-portti, jolla signaalien polariteetit saadaan tarpeen vaatiessa käännettyä. Säädettävä kynnysjännite tuodaan mikrokontrollerin kahdelta DAC:lta molempiin sarjaliikenneanalysaattorin kanaviin. DAC:lta tuleva analoginen signaali vahvistetaan vielä Microchip Technologyn MCP6L02-operaatiovahvistimella haluttuun kynnysjännitearvoonsa, jotta vaadittu kynnysjännitteen säätöalue on saavutettavissa. [40]

Komparaattoripiireinä käytetään Texas Instrumentsin kaksikanavaista LMV393-komparaattoria [41] ja XOR-piireinä Texas Instrumentsin SN74LVC86A:ta, jossa komponenttia kohden on neljä XOR-porttia [42]. Sarjaliikenneanalysaattorin jokaista kanavaa kohden on kahdeksan tasonmuunninta RS-232-standardin signaalien vastaanottamiseen. Tasonmuuntimilla muunnetaan TX- ja RX-signaalien sekä kättelysignaalien tasot nelikanavaiselle UART:lle ja latch-piirille sopivaksi. RS-232-standardin signaalien vastaanottamiseen käytetty komparaattorikytkentä on esitetty kuvassa 5.5.



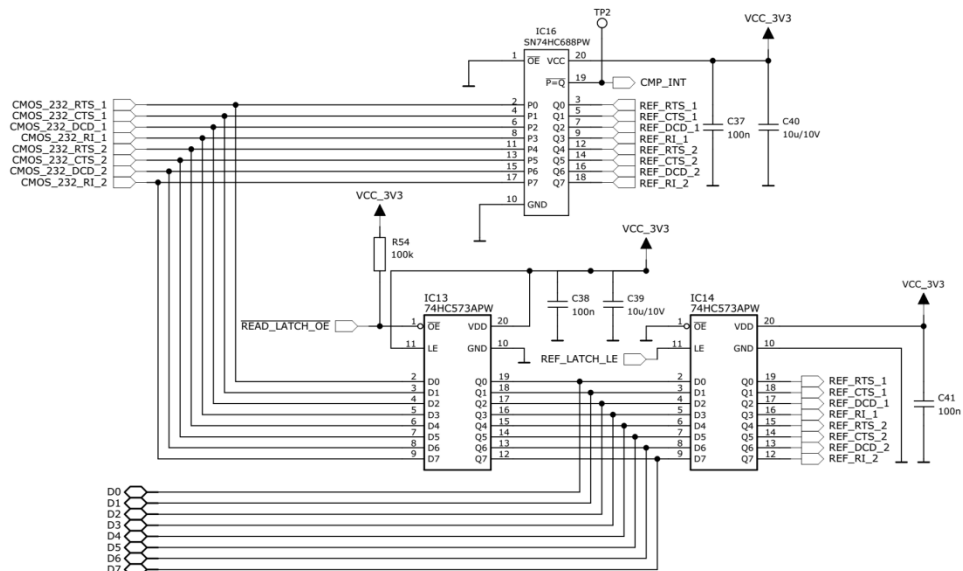
**Kuva 5.5.** RS-232-standardin signaalien vastaanottamiseen käytetty komparaattorikytkentä.

Komparaattorille sisään tulevan signaalin taso lasketaan vastuksien R13 ja R21 jännitteenjaolla. Kuvan kytkennässä kondensaattorit C21 ja C22 toimivat sovituskondensaattoreina ja vastukset R25 ja R26 muodostavat hystereesin sisääntulevaa signaalia varten. Vastukset R25 ja R26 vaikuttavat lisäksi DAC:lta tulevan jännitteen tasoon, jota käytetään sisääntulevien signaalien kynnysjännitteenä. Komparaattorikytkennän lähtöön on kytketty led ilmaisemaan kytkentään sisään tulevaa signaaliliikennettä.

### 5.3.9 Kättelysignaalien kaappaus

Sarjaliikenneanalysaattoriin kytkettyjen laitteiden RS-232-standardin mukaisten kättelysignaalien tasojen tallentamiseen käytetään kahta Texas Instrumentsin valmistamaa SN74HC573A 8:8 latch-piiriä sekä 8-bittistä SN74HC688-komparaattoria. [43, 44] Komparaattorilla vertaillaan edellisten ja nykyisten kättelysignaalien tasoja, ja kun kättelysignaalin tasot ovat eriävät, aiheuttaa komparaattori mikroprosessorille keskeytyksen.

Kuvassa 5.6 on esitettynä kättelysignaalien kaappauksessa käytetty latch-toteutuksen piirikaaviokuva. Vasemmanpuoleiseen latch:iin (IC13) tallennetaan kättelylinjojen nykyinen tila, jolloin kättelylinjojen nykytaso voidaan välittää mikroprosessorille väylän kautta. Oikeanpuoleiseen latch:iin (IC14) tallennetaan tieto edellisestä kättelylinjojen tasosta, jotta sitä voidaan käyttää 8-bittisen komparaattorin (IC16) toisena vertailukohtana. Kytkenällä tallennetaan molempien sarjaliikenneanalysaattorin kanavien RTS-, CTS-, DCD- ja RI-signaalien tasot.



*Kuva 5.6. Kättelysignaalien toteutuksessa käytetty piirikaaviokytkentä.*

### 5.3.10 Ulkoiset liitännät

Sarjaliikenneanalysaattorin ulkoisista liitännöistä kahta BNC-liitintä käytetään sarjaliikenneanalysaattorin ulkopuoliseen tahdistamiseen. BNC-liittimet on kytketty niin, että tahdistussignaali voidaan generoida mikroprosessorilta ja jakaa muille sarjaliikenneanalysaattoreille BNC-liittimen kautta. Sarjaliikenneanalysaattorille voidaan myös tuoda tahdistussignaali, jolloin se liitetään toiseen BNC-liittimeen ja saadaan toisesta BNC-liitimestä jatkettua edelleen toiselle sarjaliikenneanalysaattorille.

Kanavaan kytkettävät signaalit kytketään D-25-liittimen kautta. D-25-liitin sisältää liitännät RS-232-, RS-422- ja RS-485-standardin signaalien vastaanottamiseen

ja lähettämiseen. D-25-liittimen sisältämät liitännät selityksineen on koottu taulukkoon 5.1. Taulukossa on merkitty erikseen kanavien 1 ja 2 signaaleissa käytetyt nimet, signaalien suunnat ja niiden selitykset.

**Taulukko 5.1.** Sarjaliikenneanalysaattorin D-25-liittimen sisältämät liitännät.

D-25	Kanava 1	Kanava 2	Selitys	Signaalin suunta
1	GND	GND	Maapotentiaali	-
2	422_TXD_A-_1	422_TXD_A-_2	RS-485/RS-422 kääntävä tulo/lähtö	Tulo/Lähtö
3	422_TXD_B+_1	422_TXD_B+_2	RS-485/RS-422 ei- kääntävä tulo/lähtö	Tulo/Lähtö
4	GND	GND	Maapotentiaali	-
5	232_CTS_1	232_CTS_2	RS-232 CTS	Tulo
6	232_RTS_1	232_RTS_2	RS-232 RTS	Tulo
7	232_RXD_1	232_RXD_2	RS-232 RXD	Tulo
8	232_TXD_1	232_TXD_2	RS-232 TXD	Tulo
9	232_RI_1	232_RI_2	RS-232 RI	Tulo
10	232_DCD_1	232_DCD_2	RS-232 DCD	Tulo
11	232_DSR_1	232_DSR_2	RS-232 DSR	Tulo
12	232_DTR_1	232_DTR_2	RS-232 DTR	Tulo
13	GND	GND	Maapotentiaali	-
14	GND	GND	Maapotentiaali	-
15	422_RXD_A-_1	422_RXD_A-_2	RS-485/RS-422 kääntävä tulo	Tulo
16	422_RXD_B+_1	422_RXD_B+_2	RS-485/RS-422 ei- kääntävä tulo	Tulo
17	PORT1_DC_IN	PORT2_DC_IN	Kanavaan kytketyn laitteen käyttöjännitteen mittaus	Tulo
18	PROG_1	PROG_2	Ohjelmointi	Lähtö
19	VBUS_5V0	VBUS_5V0	Käyttöjännite 5V lähtö	Lähtö
20	ADAPT1_ID1	ADAPT2_ID1	Mittausadapterin tunnistus 1	Tulo
21	ADAPT1_ID0	ADAPT2_ID0	Mittausadapterin tunnistus 0	Tulo
22	RS232_TXD_1	RS232_TXD_2	RS-232 TXD	Lähtö
23	RS232_RTS_1	RS232_RTS_2	RS-232 RTS	Lähtö
24	RS232_DTR_1	RS232_DTR_2	RS-232 DTR	Lähtö
25	GND	GND	Maapotentiaali	-

Sarjaliikenneanalysaattorin D-25-liittimen pinnejä 2 ja 3, 15 ja 16 käytetään RS-422- ja RS-485-standardin signaalien mittaamiseen. RS-422-standardin signaalien mittauksessa pinnien 2 ja 3 kautta mitataan TX-linjan signaaleja. RS-485-standardin signaalien mittauksessa pinnit 2 ja 3 toimivat TX- ja RX-linjojen tuloina, jos tiedonsiirto tapahtuu half-duplex-tyyppisesti. RS-422-standardin RX-signaalien mittaamiseen käytetään liittimen pinnejä 15 ja 16. Jos RS-485-standardin tiedonsiirto tapahtuu full-duplex-tyyppisesti, mitataan pinnien kautta RS-485-standardin RX-linjaa. RS-232-standardin signaalien mittaamiseen käytetään liittimen pinnejä 5–12.

PORT1\_DC\_IN- ja PORT2\_DC\_IN-pinnien kautta on mahdollista mitata esimerkiksi sarjaliikenneanalysaattoriin liitetyn laitteen käyttöjännite. PROG\_1- ja PROG\_2-pinnien kautta voidaan liitintään kytketyn laitteen pinni ohjata haluttuun tilaan esimerkiksi ohjelmointia varten. VBUS\_5V0-pinnin kautta tarjotaan 5V:n käyttöjännite laitteille, joilla ei ole omaa sähkönsyöttöä. Sarjaliikenneanalysaattoriin liitetyn mittausadapterin tunnistus tapahtuu pinnien 20 ja 21 kautta. Mittausadapterin tunnistuksen avulla tunnistetaan tilanteet, joissa PC-ohjelmaan asetetut mittausasetukset eivät vastaa sarjaliikenneanalysaattoriin liitettyä mittausadapteria. RS-232-standardin signaalien generoimiseen käytetään pinnejä 22–24. Pinnien kautta saadaan RS-232-standardin tasoiset TXD-, RTS- ja DTR-signaalit. RS-422- ja RS-485-standardin TXD-signaalin generoimiseen käytetään pinnejä 2 ja 3.

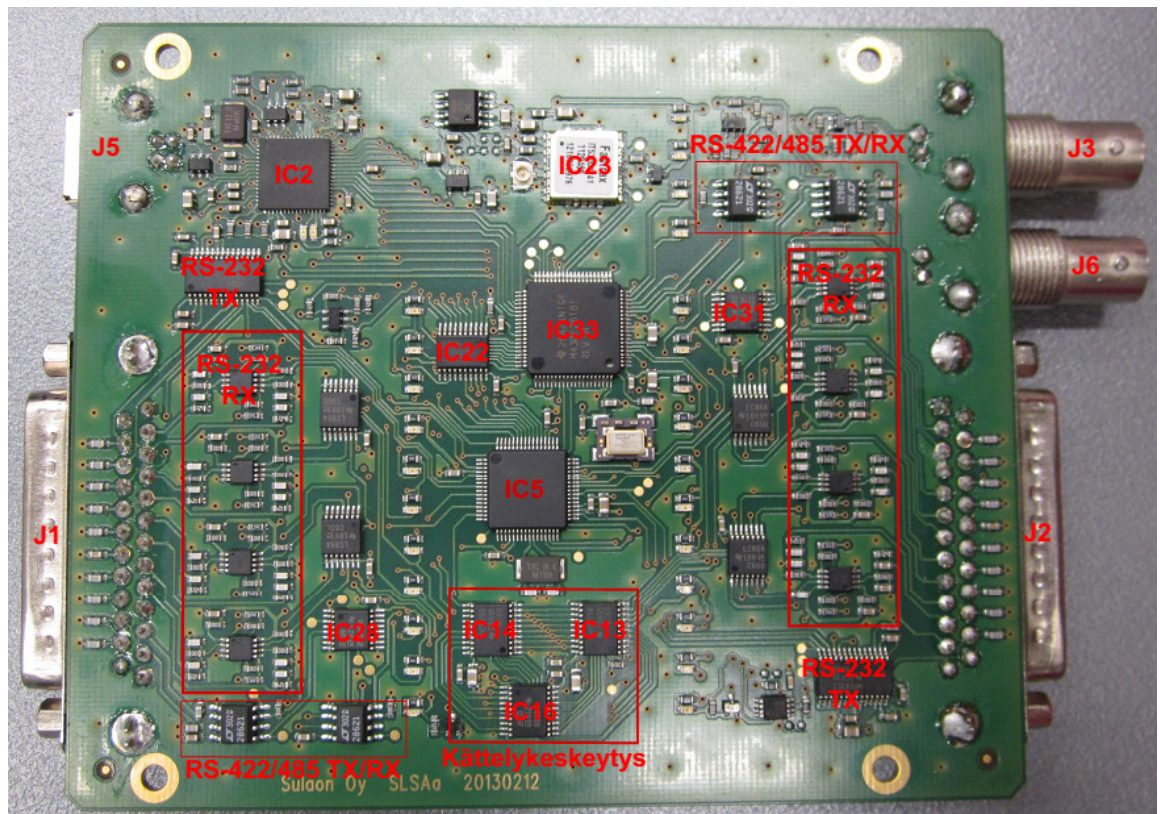
## 5.4 Piirilevyn suunnittelu

Sarjaliikenneanalysaattorin piirilevyn suunnittelu aloitettiin suunnittelua rajaavien komponenttien sijoittelulla. Laitteen tuli mahtua Hammond Manufacturing:n koteloon 1455L1201. [45] Kotelon sisälle mahtuva piirilevy sai kotelon rajoitukset huomioon ottaen olla mitoiltaan maksimissaan 120x100 mm, josta komponentteja voitiin sijoitella 120x95 mm:n alueelle. Lisäksi aivan piirilevyn reunoille ei voitu sijoittaa kovin korkeita komponentteja, sillä kotelon sisäpuolen reunan kaarevuus asetti omat rajoituksensa sijoitettavien komponenttien korkeudelle.

Laitteen ulkoisten liitintöjen tuli sijaita laitteen reunoilla niin, että liitännät saatiin tulemaan kotelosta ulos. Laitteen ja kahden kanavan tilasta kertovat ledit sijoitettiin niin, että ne näkyivät laitteen käyttäjälle loogisena ryhmänä. Piirilevymateriaalina käytettiin FR-4 nelikerroslevyä. Piirilevyn ensimmäistä ja kolmatta kerrosta käytettiin pääsääntöisenä reitityskerroksena; toinen kerros oli kokonaan varattu maatasoksi, jolloin maatasosta saatiin mahdollisimman ehjä. Neljättä piirilevykerrosta käytettiin reititykseen vain, jos reititystä ei saatu toteutettua ensimmäisellä tai kolmannella piirilevykerroksella. Komponentit sijoiteltiin piirilevyille toiminnallisina lohkoina, jolloin johdinvedot lohkojen sisällä tulivat mahdollisimman lyhyiksi.

Suunnitellun piirilevyn layout on esitetty kuvassa 5.7. Kuvaan on lisäksi havainnointia helpottamaan lisätty komponenttien ja moduulien fyysiset sijainnit piirilevyllä. D-25-liittimet (J1 & J2) sijoitettiin piirilevyn molemmille reunoille niin,

että ne tulivat riittävästi kotelon seinästä läpi. D-25-liittimet eivät mahtuneet leveytensä takia vierekkäin samalle sivulle, joten ne sijoitettiin piirilevyn vastakkaisille reunoille. Toiselle puolelle D-25-liittimen (J1) kanssa sijoitettiin myös USB-liitin (J5). Vastakkaiselle puolelle toisen D-25-liittimen (J2) kanssa sijoitettiin lisäksi ulkoiseen tahdistukseen tarkoitetut BNC-liittimet (J3 & J6). Piirilevyn alapuolelle sijoitettiin kaikki läpiladottavat komponentit eli D-25-liittimet (J1 & J2), USB-liitin (J5) ja BNC-liittimet (J3 & J6), sillä komponenttien viemä suhteellinen pinta-ala piirilevyltä oli suuri. Pintaliitoskomponentit sijoitettiin läpiladottavien komponenttien vastakkaiselle puolelle eli piirilevyn yläpuolelle. Näin saatiin suurin mahdollinen tila piirilevyn pinnalta pintaliitoskomponenttien sijoittelulle.



**Kuva 5.7.** Sarjaliikenneanalysaattorin tärkeimpien komponenttien ja lohkojen sijainnit piirilevyllä.

Mikroprosessorin (IC33), nelikanavaisen UART:n (IC5) ja USB-UART/FIFO:n (IC2) väliseen kommunikointiin käytetään 8-bittistä väylää. Väylään liitettiin myös kättelysignaalien havaitsemiseen tarkoitetut latchit (IC13 & IC14), 8-bittinen komparaattori (IC16) sekä ledien ohjaukseen käytetty latch (IC22). Väylä pyrittiin sijoittamaan piirilevylle siten, että se kulkisi yhtenä selkeänä linjana, jolloin komponenttien liittäminen siihen olisi helppoa. USB-UART/FIFO (IC2) sijoitettiin piirilevyn vasempaan reunaan USB-liittimen (J5) viereen ja muut väylään tulevat komponentit piirilevyn keskelle, jolloin väylästä saatiin mahdollisimman selkeä ja



lyhyt. Ulkoisten liittimien, väylän ja väylään tulevien komponenttien sijoittelun jälkeen oli piirilevyn suunnitteluun vaikuttavat pääkohdat ratkaistu.

Sarjaliikenneanalyysointilaitteen kahden kanavan D-25-liittimien (J1 & J2) sijaitessa piirilevyn molemmilla reunoilla, jaettiin yhtä kanavaa kohden tulevat tasonmuuntimet oheiskomponentteineen omiksi ryhmikseen, ja ne sijoitettiin laitteen reunoille lähelle oman kanavan D-25-liittintä. RS-232-standardin TXD- ja RXD-signaalien sekä RS-422/485-standardin signaalien valinta tapahtuu multiplekserien (IC28 ja IC31) kautta. Kanavan RS-232-signaalien tasonmuuntimet (RS-232) ja RS-422/485-signaalien lähetin-vastaanottimet (RS-422/485 TX/RX) sijoitettiin mahdollisimman lähelle kyseisen kanavan multiplekseriä. Osa RS-232-standardin kättelysignaalien tiloista tallennetaan latchiin IC13, joten näiden signaalien tasonmuuntimet sijoitettiin lähelle latchia.

GPS-vastaanotin (IC23) sijoitettiin piirilevyn keskelle lähelle piirilevyn reunaa, jotta GPS-vastaanottimen läheltä tai alapuolelta ei tarvitsisi vetää johdin vetoja, jotka mahdollisesti aiheuttaisivat häiriöitä GPS-vastaanottimen toimintaan. GPS-vastaanottimen datalehdien mukaan johdin vetoja useampikerroksisella piirilevyllä voidaan vetää myös GPS-vastaanottimen alta. Koska piirilevyllä oli runsaasti tilaa, ei johdin vetoja GPS-vastaanottimen alta tarvinnut kuitenkaan vetää. GPS-vastaanottimen sijaitessa piirilevyn reunalla minimoitiin siihen kytkeytyvät häiriöt muista komponenteista.

Koteloitu sarjaliikenneanalyysointilaitte on esitetty kuvassa 5.8. Sarjaliikenneanalyysointilaitteen kotelon pinnalla olevat aukot ovat piirilevyllä olevia ledejä varten. Ledien valo tuodaan piirilevyllä kotelon pinnalle valonjohtimilla.



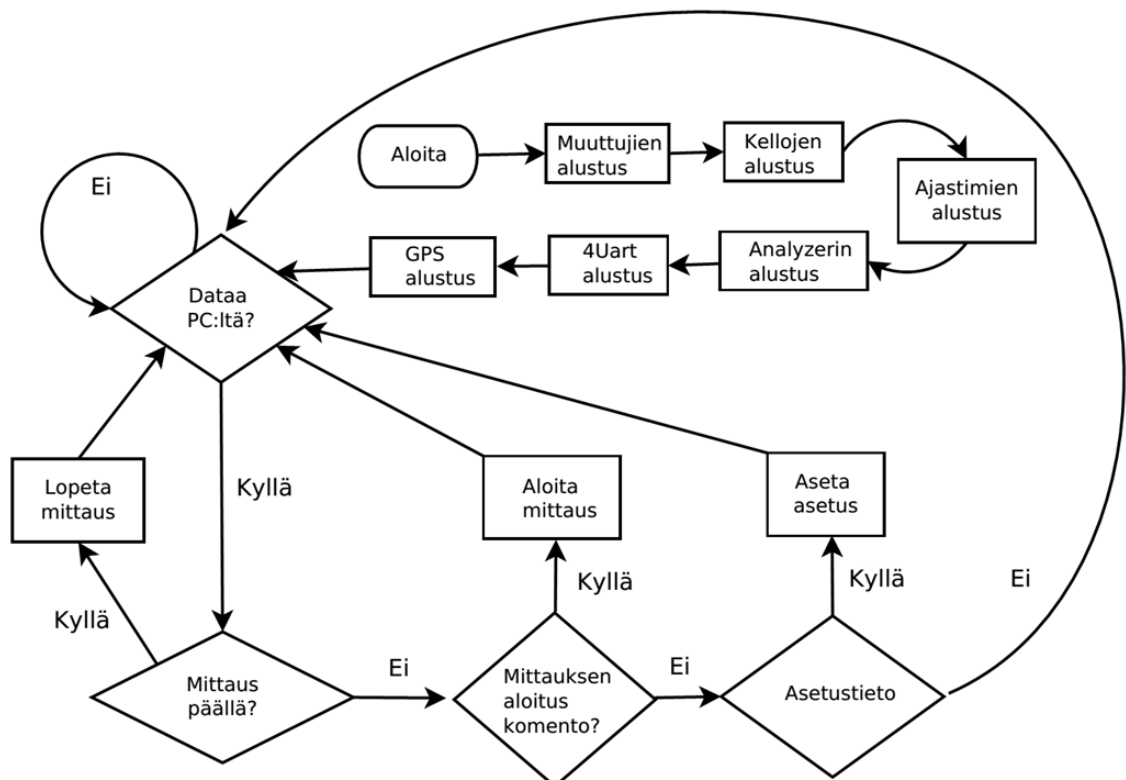
**Kuva 5.8.** Sarjaliikenneanalyysointilaitte koteloituna.

## 6 LAITTEEN OHJELMISTO

Tässä luvussa esitellään sarjaliikenneanalysaattorin ohjelmisto. Ensiksi kerrotaan sarjaliikenneanalysaattorin ohjelmiston toteutuksen pääkohdat ja toiminta, jonka jälkeen syvennyttään tarkemmin ohjelmiston toteutuksessa esiintyneisiin ongelmiin ja niiden ratkaisuihin.

### 6.1 Ohjelmiston perustoiminta

Sarjaliikenneanalysaattorin ohjelmiston toiminta on esitettyä kuvan 6.1 vuokaaviossa. Laitteen käynnistyessä alustetaan ohjelmiston käytössä olevat muuttujat ja laitteen porttien I/O-pinnit. Lisäksi alustetaan laitteen kellosignaalit ja ajastimet. Perusasetusten jälkeen asetetaan sarjaliikenneanalysaattorin oheiskomponentit ja nelikanavainen UART oikeaan toimintatilaan. Pääohjelma käynnistetään laitteen alustusten jälkeen.



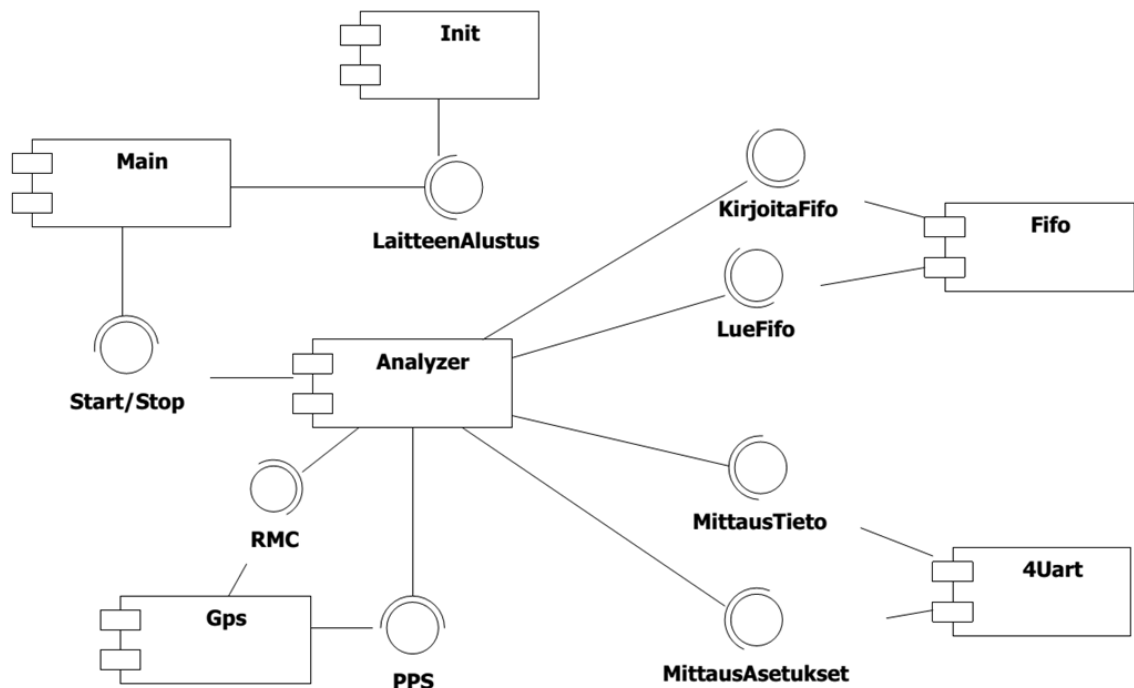
**Kuva 6.1.** Sarjaliikenneanalysaattorin ohjelmiston vuokaavio.

Sarjaliikenneanalysaattorin pääohjelma koostuu PC-ohjelmalta tulevan datan vastaanottamisesta, datan sisältämien komentojen tulkitsemisesta ja komentoja

seuraavien asetuspakettien kohdentamisesta oikealle sarjaliikenneanalysaattorin lohkolle. PC-ohjelmalta lähetetään sarjaliikenneanalysaattorille asetettavat mittausasetukset sekä voidaan aloittaa ja lopettaa mittaus. Sarjaliikenneanalysaattori on odotustilassa, kun mittaukset eivät ole aktiivisia. Tällöin pääohjelma odottaa PC:ltä tulevia asetuspaketteja ja mittaukset aloittavaa aloituskomentoa. Kun laite komennetaan aloittamaan mittaukset, laitetaan ajastimet päälle ja sallitaan keskeytykset, jolloin sarjaliikenneanalysaattori on valmis kaappaamaan tutkittavan laiteparin välisen dataliikenteen signaalit. Mittaukset jatkuvat niin kauan, kunnes lopetuskomento vastaanotetaan PC:ltä. Sarjaliikenneanalysaattorin ollessa mittauksessa sille voidaan antaa vain mittauksen lopetuskomento. Mittausasetukset on lähetettävä sarjaliikenneanalysaattorille laitteen ollessa odotustilassa.

## 6.2 Ohjelmiston moduulirakenne

Sarjaliikenneanalysaattorin ohjelmiston perusrakenne on esitetty kuvan 6.2 moduulikaaviossa. Kuvassa on esitettynä ohjelmiston moduulit sekä rajapinnat, jotka moduulit tarjoavat muiden moduulien käyttöön. Omat ohjelmamoduulinsa muodostavat PC-ohjelman ja sarjaliikenneanalysaattorin rajapintana toimiva Fifo-moduuli, 4Uart-moduuli ja Gps-moduuli. Lisäksi oman moduulinsa muodostaa Analyzer, jolla hallitaan Fifo-, 4Uart- ja Gps-moduulien toimintaa. Init-moduuli sisältää funktiot laitteen alustukseen. Pääohjelma on toteutettu Main-moduulissa.



**Kuva 6.2.** Sarjaliikenneanalysaattorin ohjelmiston moduulikaavio.

Analyzer-moduulin tarjoama rajapinta mahdollistaa mittausten aloituksen ja lopetuksen. Fifo-moduulin avulla hallitaan sarjaliikenneanalysaattorin ja PC-ohjelman välistä kommunikointia datan kirjoittamiseen ja lukemiseen FT232H-komponentin FIFO:sta. 4Uart-moduulin tärkein käyttötarkoitus on asettaa mittaasetukset sarjaliikenneanalysaattorilla tapahtuvan signaaliliikenteen kaappausta varten. Moduulilta saadaan lisäksi dataliikenteesta kaapatut signaalitiedot. Gps-moduulilla asetetaan laitteen GPS-vastaanotin oikeaan toimintatilaan sijainti- ja aikaviestien vastaanottamista varten. Pääohjelma ja laitteen alustukset tapahtuvat Main-moduulissa, joka saa alustustietonsa Init-moduulilta, jossa sijaitsevat laitteen tarvitsemat alustusfunktiot.

### **6.2.1 Main**

Main-moduuli kutsuu käynnistyessään laitteen porttien I/O-pinnien ja kellojen alustusfunktioita. Lisäksi alustetaan ajastimet ja kytketään Watchdog toimintaan. Main-moduuli asettaa lisäksi Analyzer- ja 4Uart-moduulit normaaliin toimintatilaan moduulien alustusfunktioiden kautta sekä luo oman säikeensä Gps-moduulin toimintaa varten. Alustusten jälkeen käynnistetään laitteen pääohjelma, joka pitää huolta laitteen yhdistämisestä PC-ohjelman kanssa, mittauksen aloituksesta ja lopetuksesta sekä asetustietojen välittämisestä Analyzer-moduulille. Main-moduulissa asetetaan lisäksi MCLK toimimaan 20MHz:n taajuudella. Mikrokontrollerin CPU saa kellosignaalsensa MCLK:sta.

### **6.2.2 Init**

Init-moduuli tarjoaa alustusfunktiot laitteen porttien ja kellojen alustamiseen. Laite saa kellosignaalsensa 20MHz:n TCXO-kideoskillaattorista, josta ACLK-kellosignaali asetetaan toimimaan 10MHz:n taajuudella. Mikrokontrollerin ajastimet käyttävät ACLK-kellosignaalia.

### **6.2.3 Analyzer**

Analyzer-moduuli tarjoaa rutiinit signaalien vastaanottamiselle ja laitteen asetusten hallitsemiselle. Moduuli pitää sisällään keskeytyksenpalveluohjelmat signaalien vastaanottamiselle ja tarkan aikatiedon ylläpitämiselle. Signaalien vastaanottamisesta aiheutuvan keskeytyksenpalveluohjelman vastuualueena on vastaanotetun datan lukeminen 4Uart-moduulilta ja tarkan aikaleiman generointi sekä tämän paketin välittäminen edelleen Fifo-moduulin kautta PC-ohjelmalle. Analyzer-moduuli tarjoaa lisäksi toiminnot kynnysjännitteen asettamiseen ja mittausadapterin tunnistamiseen AD-muuntimen kautta sekä hallitsee laitteelle annettujen asetusten välittämisen eteenpäin niitä tarvitseville moduuleille.

#### 6.2.4 Fifo

Fifo-moduuli tarjoaa rajapinnan datan lukemiseen ja kirjoittamiseen FT2232H-komponentin FIFO:sta. FIFO:n kautta kulkee kaikki tieto sarjaliikenneanalysaattorin ja PC-ohjelman välillä. Fifo-moduulista löytyy toiminnot yhden tai useamman merkin lukemiseen ja kirjoittamiseen.

#### 6.2.5 4Uart

4Uart-moduulin kautta laitetaan päälle mitattavan signaalitason (CMOS/TTL/RS-232 tai RS-422/485) valinta multipleksereille. Moduulin kautta asetetaan lisäksi mittaasetukset vastaanotettavan datan vaatimusten mukaisesti. Mittausta kohden voidaan asettaa vastaanotettavan datan bittinopeus. Lisäksi 4Uart mahdollistaa stop-bitin pituuden, pariteetin sekä datan pituuden asettamisen 5–8 bitin väliltä. Toteutetussa sarjaliikenneanalysaattorissa voidaan asettaa vain bittinopeus, sillä tarkempien asetusten tekeminen on jätetty toteutettavaksi myöhemmin. Lisäksi vastaanottaessa CMOS/TTL-tasoisia ja RS-232-standardin signaaleja, voidaan signaalien polariteetti kääntää tarpeen vaatiessa päinvastaiseksi ohjaamalla RS-232-tasonmuuntimien XOR-portteja nelikanavaisen UART:n kautta.

#### 6.2.6 GPS

Sarjaliikenneanalysaattorin Fastrax IT530 GPS-vastaanotin tukee NMEA 0183-standardin mukaisia viestejä. GPS-vastaanotin lähettää mikrokontrollerille NMEA 0183-standardin RMC-viestiä (Recommended Minimum Specific GNSS Data), joka pitää sisällään aika-, päivämäärä-, sijainti-, rata- ja nopeustietoa paikassa, jossa sarjaliikenneanalysaattori fyysisesti sijaitsee. GPS-vastaanottimelta saatu RMC-viesti tulkitaan ja aika-, päivämäärä- ja sijaintitiedot välitetään Analyzer-moduulille. GPS-vastaanottimelta saatava PPS-signaali vastaanotetaan automaattisesti, kun GPS-yhteys satelliitteihin on muodostunut. RMC-viestin vastaanottaminen on toteutettu omassa säikeessä, joka luodaan ja käynnistetään Main-moduulissa laitteen alustamisen aikana. Omassa säikeessä toteutettuna RMC-viestin vastaanottaminen ei hidasta sarjaliikenneanalysaattorin normaalia toimintaa.

### 6.3 Asetusten lähettäminen

Sarjaliikenneanalysaattorin mittaasetukset lähetetään PC-ohjelmalta muodossa *komento* + *arvo*. Mittaasetuksen *komento* muodostuu yhden tavun mittaisesta ASCII-merkistä, sekä *arvo* neljä tavua pitkistä asetusravosta. Yhden lähetettävän mittaasetuksen pituus on tällöin viisi tavua. *Komento*-merkin arvona hyväksytään sekä pieni että iso kirjain. *Arvo*-kenttään tulevan asetustiedon koko vaihtelee asetustiedosta riippuen. Asetusten vastaanottamiseen ja tulkintaan voidaan käyttää samaa toiminnallisuutta, koska asetustiedon formaatti pysyy samanlaisena. Taulukkoon 6.1 on koottu sarjaliikenneanalysaattorille lähetettävät asetustiedot, joista ilmenevät

käytetyt *komento*-merkit ja *arvo*-kentän rakenne. Taulukossa oleva ”x” tarkoittaa, että tavun sisällöllä ei ole vaikutusta asetuskomentoon.

**Taulukko 6.1.** Sarjaliikenneanalyysoijalle lähetettävät asetuskomennot.

Toiminto	Komento	Arvo[3] MSB	Arvo[2]	Arvo[1]	Arvo[0] LSB
Signaalitason valinta	M/m	x	x	Signaalitaso kanava 2	Signaalitaso kanava 1
Bittinopeuden valinta	B/b	Bittinopeus kanava 2		Bittinopeus kanava 1	
Kynnysjännitteen valinta	V/v	x	x	Kynnysjännite kanava 2	Kynnysjännite kanava 1
Signaalien invertointi	I/i	x	x	Invertointi kanava 2	Invertointi kanava 1
GPS-tahdistus	G/g	x	x	x	Päälle/pois
Signaalien valinta	K/k	x	x	Mitattavat signaalit	

Sarjaliikenneanalyysoijain multipleksereillä ohjattu signaalitason valinta tapahtuu CMOS/TTL/RS-232- ja RS-422/485-tasojen signaalien kesken, jolloin laitteelle lähetetään *Signaalitason valinta*-toiminto. Toiminto koostuu *komento*-merkin ”m” lisäksi kahden tavun mittaisesta tiedosta kummallekin kanavalle asetettavasta signaalitasosta. Kanavakohtainen tieto on laitettu molemmille kanaville varattuun tavun mittaiseen kenttään.

Analysoitavan signaalin bittinopeus asetetaan muuttamalla UART:n kanavien 16-bittisen jakajan arvoa. Bittinopeuden asettaminen tapahtuu lähettämällä *Bittinopeuden valinta*-toiminto. Sarjaliikenneanalyysoijain kanavien bittinopeusarvon asetusta varten on varattu kaksi kahden tavun pituista kenttää.

CMOS/TTL- ja RS-232-tasoisia signaaleja mitattaessa kynnysjännitteen asettaminen tapahtuu lähettämällä *Kynnysjännitteen valinta*-toiminto. Toiminto koostuu *komento*-merkistä ”v” sekä kahdesta tavun mittaisesta kentästä. Tavun mittaiseen kenttään laitetaan DAC:lle asetettava rekisterin arvo. Kynnysjännitteen asettaminen tapahtuu muuttamalla mikroprosessorin DAC:in DAC12\_xDAT rekisterin arvoa, jolla muuntimen lähtöjännitteeksi voidaan asettaa 0 V ... 2,5 V. RS-232-tasomuuntimien kytkentä vaikuttaa DAC:lta saatavan jännitteen arvoon, jolloin kynnysjännitteeksi saadaan 0,5 ... 5,0 V.

Vastaanotettujen CMOS/TTL- ja RS-232-tasojen signaalien polariteetin kääntäminen tapahtuu lähettämällä *Signaalien Invertointi*-toiminto. Toiminto koostuu *komento*-merkistä ”i” ja kanavien invertointitiedosta kahden tavun mittaisena kenttänä.

Toiminto kääntää CMOS/TTL- ja RS-232-tasojen signaalien tasonmuuntimien vastaanottamien signaalien polariteetin.

GPS-tahdistus asetetaan lähettämällä *GPS-tahdistus*-toiminto. Toiminto koostuu *komento*-merkistä ”g” ja tavun mittaisesta tiedosta GPS-tahdistuksen asettamisesta. GPS-tahdistus saa aikaan sen, että signaalien mittauksen alkaessa mittaus alkaa vasta sitten, kun tahdistus on valmis. Tahdistus saadaan GPS-vastaanottimen PPS-signaalista.

Sarjaliikenneanalyysointilaite mitattavat signaalit valitaan lähettämällä *Signaalien valinta*-toiminto. Toiminto koostuu *komento*-merkistä ”k” ja kahden tavun mittaisesta kentästä päälle laitettavista signaaleista

## 6.4 Signaalien mittaus

UART:n TX- ja RX-signaalilinoilta vastaanotettu tavu aiheuttaa mikroprosessorille keskeytyksen ja ohjelman suorituksen siirtymisen keskeytyksenpalveluohjelmaan. Vastaavasti keskeytys aiheutuu, kun tilan muutos tapahtuu RTS-, CTS-, DCD- tai RI-linjalla. DTR- ja DSR-linjojen signaalien tila luetaan aina, kun RTS-, CTS-, DCD- tai RI-linjan signaali aiheuttaa keskeytyksen. Näin ollen signaalien tilan muutos DTR- ja DSR-linjalla ei aiheuta keskeytystä. DTR- ja DSR-linjojen signaalien tila tallennetaan UART:n rekisteriin, josta ei ole mahdollista aiheuttaa keskeytystä mikroprosessorille. DTR- ja DSR-signaalien tilan muutosten havainnoimiseen riittää se, että ne luetaan, kun latch-lohko aiheuttaa keskeytyksen.

Keskeytyksen aikana väylän kautta FT2232H-komponentin FIFO:lle kirjoitetaan 10 tavun pituinen signaalipaketti, joka koostuu vastaanotetun signaalien tunnisteesta, aikaleimasta ja datasta. Jokaiselle TX- ja RX-linjan signaalille on oma tunniste. Kättelysignaalien tunniste riippuu siitä, onko kättelysignaalit luettu UART:lta vai latchilta. Signaalien tunnisteina käytetään yhden tavun mittaista unsigned char -muuttujaa. Aikaleima koostuu vastaanotetun signaalien sekunti-, millisekunti- ja mikrosekuntiarvosta. Sekuntiarvo on 32-bittinen muuttuja, jolla pystytään vastaanottamaan signaaleita yhtäjaksoisesti  $2^{32}$  sekunnin eli yli 130 vuoden ajan. 16-bittisessä muuttujassa maksimi vastaanottoaika olisi noin 18 tuntia, joka ei riittäisi pidempiaikaiseen dataliikenteen analysointiin. Sekä millisekunti- että mikrosekuntiarvot tallennetaan neljä tavua pitkään muuttujaan. Data tallennetaan yhden tavun kokoiseen muuttujaan, jonka sisältö vaihtelee sen mukaan, onko kyseessä TX-, RX- vai kättelysignaali. TX- ja RX-linoilta vastaanotettu data liitetään signaalipakettiin sellaisenaan, mutta kättelysignaalien data koostuu usean kättelysignaalien signaalien tasosta. Kättelysignaalien muutoksen yhteydessä lähetetään aina peräkkäin kaksi signaalipakettia. Toinen signaalipaketti pitää sisällään UART:lta ja toinen latchilta luettujen kättelysignaalien tasot. Kyseinen toteutus vaaditaan, sillä yhdessä signaalipaketissa voidaan välittää kerrallaan vain kahdeksan kättelylinjan tilat.

Taulukkoon 6.2 on koottu sarjaliikenneanalyysointilaite PC-ohjelmalle lähettämät signaalipaketit selityksineen. Sarjaliikenneanalyysointilaite käyttää kaapattujen signaalitietojen välittämiseen kuutta erilaista signaalipakettia.

**Taulukko 6.2.** Sarjaliikenneanalysoijan PC-ohjelmalle lähettämät signaalipaketit.

Signaali-paketti	Tavu[9] Signaalin-tunniste	Tavu[8:5] Aikaleima (s)	Tavu[4:3] Aikaleima (ms)	Tavu[2:1] Aikaleima ( $\mu$ s)	Tavu[0] Data
Kanava 1, TX	SIGNAL_TX1	s-aikaleima	ms-aikaleima	$\mu$ s-aikaleima	TX1-linjalta kaapattu data
Kanava 1, RX	SIGNAL_RX1	s-aikaleima	ms-aikaleima	$\mu$ s-aikaleima	RX1-linjalta kaapattu data
Kanava 2, TX	SIGNAL_TX2	s-aikaleima	ms-aikaleima	$\mu$ s-aikaleima	TX2-linjalta kaapattu data
Kanava 2, RX	SIGNAL_RX2	s-aikaleima	ms-aikaleima	$\mu$ s-aikaleima	RX2-linjalta kaapattu data
4UART, kättely-signaali	SIGNAL_HSL	s-aikaleima	ms-aikaleima	$\mu$ s-aikaleima	Kättely-signaalin tasot
Latch, Kättely-signaali	SIGNAL_HSU	s-aikaleima	ms-aikaleima	$\mu$ s-aikaleima	Kättely-signaalin tasot

## 6.5 Signaalien tarkka ajoitus

Sarjaliikenneanalysoijassa käytetty mikrokontrolleri MSP430F2618 sisältää kaksi 16-bittistä ajastin-lohkoa. Timer\_A-lohko sisältää kolme ja Timer\_B-lohko seitsemän ajastin/kaappaus-rekisteriä. Sarjaliikenneanalysoijan ohjelmiston toteutuksessa Timer\_A-lohkosta tarvitaan kahta rekisteriä reaaliaikaiseen aikatiedon ylläpitämiseen. Timer\_B-lohkosta käytetään kaikkia rekistereitä signaalilinjoilta kaapattujen signaalien ajanhetkien kaappaukseen sekä GPS-tahdistuksen aikaansaamiseen.

Timer\_A-lohkon rekisteriin TACCR0 asetetaan vertailuarvo, jolla generoidaan yhden millisekunnin pituinen aikakeskeytys aikatiedon ylläpitämiseen. Lisäksi TACCR1 asetetaan laskemaan keskeytys kohdassa TACCR0/2, joka on rekisteriin TACCR0 asetetun arvon puoliväli. Puolivälin keskeytyksen avulla saadaan signaalin kaapattu aikaleima oikein tilanteissa, joissa signaalilinjan aiheuttama keskeytys tapahtuu yhden millisekunnin aikakeskeytyksen reunalla. Aikakeskeytyksen reunalla ei tiedetä onko Timer\_A-lohkon avulla ylläpidettyä aikatietoa jo päivitetty, jolloin käyttämällä hyväksi puolivälin keskeytystä saadaan todellinen aikaleima.

Timer\_B-lohkon neljää rekisteriä käytetään sarjaliikenneanalysoijan kanavien TX- ja RX-signaalilinjoilla tapahtuvien muutosten ajanhetkien kaappaukseen. Kättelysignaalien kaappauksessa latch-lohkon aiheuttama keskeytys kaapataan Timer\_B-lohkon rekisterillä, kun kättelylinjoilla tapahtuu muutos. Lisäksi yhtä



Timer\_B-lohkon rekisteriä käytetään GPS-vastaanottimen PPS-signaalin avulla tehtävän tahdistuksen generoimiseen. Timer\_B-lohkon TBCCR0 alustetaan laskemaan samanaikaisesti Timer\_A-lohkon tavoin yhden millisekunnin pituista aikaa, jolloin keskeytyksen tapahtuessa signaalilinjalla tapahtuvien muutosten vuoksi saadaan Timer\_A-lohkon aikatiedon lisäksi mikrosekuntitieto signaalin kaappaushetkestä.

Sarjaliikenneanalyysointilohkon ohjelmiston aikakriittisin kohta on aikaleiman ja dataa sisältävän signaalipaketin lähettäminen väylän kautta FT2232H-komponentin FIFO:lle. Keskeytyksenpalveluohjelman tulee suoriutua riittävän nopeasti yksittäisen aikaleiman lähettämisestä, sillä teoriassa samanaikaisesti prosessorin suoritusaikaa voi olla odottamassa neljä eri keskeytyslähdettä. Keskeytykset tulee käsitellä ennen saman keskeytyslähteen aiheuttamaa uutta keskeytystä, jotta mitään dataa ei menetetä.

## 6.6 GPS-tahdistus

Sarjaliikenneanalyysointilohko voidaan tahdistaa GPS-vastaanottimelta saatavan PPS-signaalin avulla. Tahdistusta tarvitaan tilanteissa, jossa halutaan analysoida ajallisesti kohdakkain useamman sarjaliikenneanalyysointilohkon vastaanottamaa dataa. Tällöin GPS-tahdistuksella saavutetaan se, että mittaukset alkavat PPS-signaalin suhteen samanaikaisesti jokaisessa sarjaliikenneanalyysointilohkossa.

GPS-tahdistus asetetaan PC-ohjelmistolta, jolloin sen asetuskomento lähetetään sarjaliikenneanalyysointilohkolle ennen mittauksen aloittamista. Aikaleimojen laskemiseen käytetyt laskurit käynnistetään heti mittauksen alkaessa. Ilman GPS-tahdistusta signaalien vastaanottaminen aloitetaan välittömästi, jolloin sallitaan mitattavien signaalien aikaansaamat keskeytykset ja signaalipakettien lähettäminen PC-ohjelmalle.

GPS-tahdistuksen ollessa päällä sallitaan aluksi vain PPS-signaalin aikaansaama keskeytys. Mittausten alkamisen jälkeen ensimmäinen GPS-vastaanottimelta saatava PPS-signaali aiheuttaa keskeytyksen. Keskeytyksen jälkeen luetaan viimeisin RMC-viestin sisältämä aika- ja paikkatieto, joka on tallennettuna mikroprosessorin muistiin. Aika- ja paikkatieto sisältää ennen nykyistä PPS-signaalia vastaanotetun RMC-viestin tiedot, sillä PPS-signaalin lähetyksen tapahtuu ennen uutta RMC-viestiä. PPS-signaaliin liittyvän RMC-viestin odottaminen hidastaisi ohjelman toimintaa, jolloin käyttämällä vanhan RMC-viestin tietoja vältytään ylimääräiseltä odottamiselta.

Sarjaliikenneanalyysointilohko lähettää aika- ja paikkatietojen lisäksi PC-ohjelmalle erotuksen siitä ajasta, joka kului mittauksen alkamisesta ensimmäisen PPS-signaalin vastaanottamiseen. Mitattavien signaalien mittaukset alkavat 3 sekunnin kuluttua ensimmäisen PPS-signaalin vastaanottamisesta, jolloin sallitaan mitattavien signaalien aikaansaamat keskeytykset. Ensimmäisen PPS-signaalin vastaanottamiseen voi kulua maksimissaan lähes sekunti siitä, kun mittaukset on aloitettu. Mittausten alkamiseen varattu 3 sekuntia riittää siihen, että tahdistus ehditään saamaan valmiiksi. PC-ohjelma muuttaa sarjaliikenneanalyysointilohkolta lähetettyjen signaalipakettien aikaleimat vastaamaan mittauksen oikeaa aloituskohtaa.

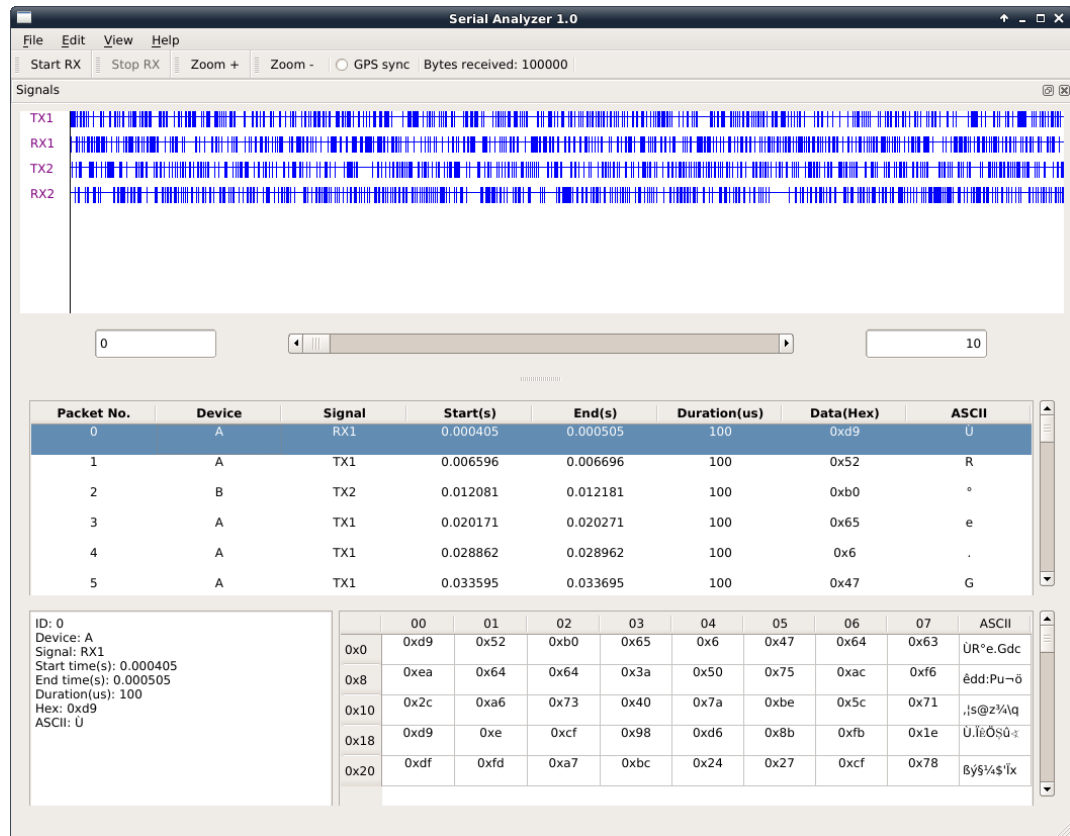
## 7 PC-OHJELMA

Sarjaliikenneanalysaattorin tehokasta käyttöä varten toteutettiin erillinen PC-ohjelma nimeltään Serial Analyzer 1.0. PC-ohjelman kautta pystytään hallitsemaan sarjaliikenneanalysaattorin toimintoja, asettamaan mittausasetukset sekä analysoimaan sarjaliikenneanalysaattorin kaappaamaa dataa. Lisäksi PC-ohjelman kautta aloitetaan ja lopetetaan mittaus.

Tässä luvussa esitellään PC-ohjelman yleinen toteutus ja rakenne. Lisäksi kerrotaan ohjelman toiminnoista ja toteutuksen kannalta tärkeimmistä suunnitteluratkaisuista.

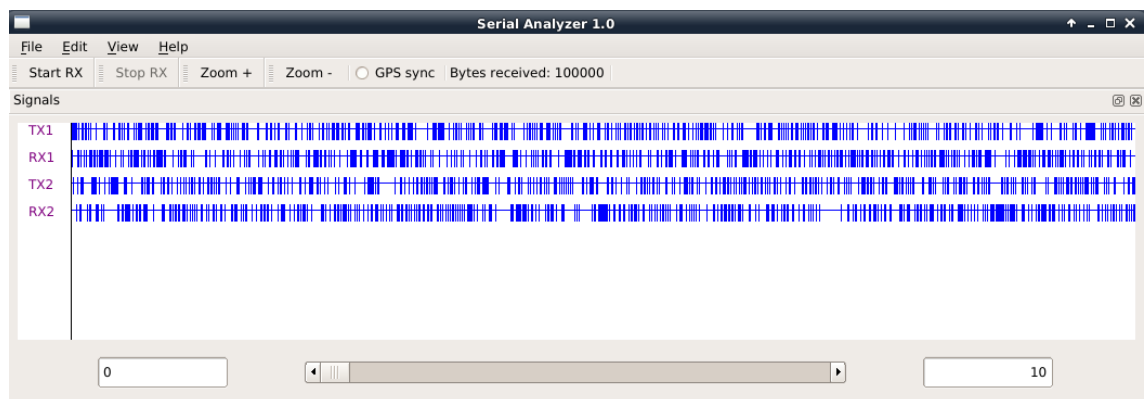
### 7.1 Ohjelman yleinen toteutus ja rakenne

PC-ohjelma toteutettiin Python-ohjelmointikielellä ja siihen liittyvällä graafisten käyttöliittymien toteutukseen tarkoitettulla Qt-kehitysympäristön tarjoavalla PySide-kirjastolla. Python-ohjelmointikielen etuina on sen helppo opittavuus sekä kielen vapaa käytettävyys kaupallisessa tarkoituksessa. PySide-kirjaston tarjoama Qt-kehitysympäristö on alustariippumaton ja se sisältää monipuoliset työkalut graafisten käyttöliittymien toteutukseen. Ohjelman toteutuksessa Python-ohjelmointikielestä käytettiin versiota 2.7 ja PySide-kirjastosta versiota 1.0.7. Serial Analyzer 1.0:n käyttöliittymä on esitetty kuvassa 7.1.



**Kuva 7.1.** Sarjaliikenneanalysaattorin käyttöliittymä.

PC-ohjelman käyttöliittymän näkymä voidaan jakaa kolmeen osaan. Käyttöliittymän ylimmän näkymän muodostaa signaalinäkymä, jossa näytetään sarjaliikenneanalysaattorin kaappaamat signaalit. Näkymään piirretään ne signaalit, jotka ohjelman käyttäjä on asettanut mitattavaksi. Kuvassa 7.2 on esitetty signaalien esittämiseen käytetty signaalinäkymä.



**Kuva 7.2.** Vastaanotetut signaalit piirretään signaalinäkymään.

Keskimmäisen osan muodostaa datanäkymä, johon listataan laiteparin välillä lähetetyt datapaketit. Datapaketit on koostettu laitteiden väliltä kaapatuista tavuista,

jotka ohjelma yhdistää yhteen kuuluviksi datapaketeiksi asetettujen sääntöjen mukaisesti. Datanäkymä on esitetty kuvassa 7.3.

Packet No.	Device	Signal	Start(s)	End(s)	Duration(us)	Data(Hex)	ASCII
0	A	RX1	0.000405	0.000505	100	0xd9	U
1	A	TX1	0.006596	0.006696	100	0x52	R
2	B	TX2	0.012081	0.012181	100	0xb0	°
3	A	TX1	0.020171	0.020271	100	0x65	e
4	A	TX1	0.028862	0.028962	100	0x6	.
5	A	TX1	0.033595	0.033695	100	0x47	G

**Kuva 7.3.** Vastaanotetut datapaketit listataan datanäkymässä.

Käyttöliittymän alaosassa on kaksiosainen analyysinäköymä, jossa oikeanpuoleisessa osassa näytetään TX- ja RX-linjoilta kaapatut tavut vastaanottojärjestyksessä. Vasemmanpuoleisessa näkymässä listataan tietoja vastaanotetusta datapaketista, joka on valittuna datanäkymästä. Kuvassa 7.4 on esitetty analysointiin tarkoitettu analyysinäköymä.

ID: 0 Device: A Signal: RX1 Start time(s): 0.000405 End time(s): 0.000505 Duration(us): 100 Hex: 0xd9 ASCII: U		00	01	02	03	04	05	06	07	ASCII
	0x0	0xd9	0x52	0xb0	0x65	0x6	0x47	0x64	0x63	UR°e.Gdc
	0x8	0xea	0x64	0x64	0x3a	0x50	0x75	0xac	0xf6	ëdd:Pu-ö
	0x10	0x2c	0xa6	0x73	0x40	0x7a	0xbe	0x5c	0x71	,!s@z%Äq
	0x18	0xd9	0xe	0xcf	0x98	0xd6	0x8b	0xfb	0x1e	Ü.İēÖŞû<
	0x20	0xdf	0xfd	0xa7	0xbc	0x24	0x27	0xcf	0x78	By\$%\$!x

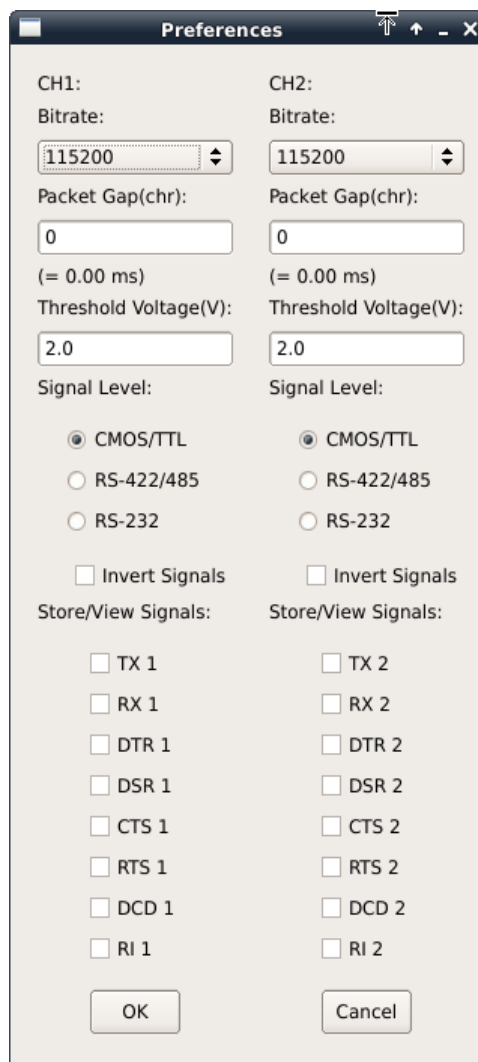
**Kuva 7.4.** Analyysinäköymässä näytetään tietoa vastaanotetuista tavuista ja datapaketeista.

## 7.2 PC-ohjelman toiminnot

Serial Analyzer 1.0 ohjelman päävalikko löytyy käyttöliittymän yläosasta. Päävalikosta löytyvät *File*-, *Edit*-, *View*- ja *Help*-valikot. *File*-valikko pitää sisällään *Connect Device*-, *New*-, *Open .bin*-, *Save to .bin*-, *Save to .txt*- ja *Exit*-toiminnot. *Connect Device*-toiminnon kautta yhdistetään sarjaliikenneanalysointilaite ja PC-ohjelma antamalla sarjaportti, johon sarjaliikenneanalysointilaite on liitetty. *New*-toiminto asettaa sarjaliikenneanalysointilaitteen PC-ohjelman asetukset oletusarvoisiksi sekä tyhjentää ohjelman näkymät vastaanotetuista signaaleista ja datasta uutta mittausta varten. *Open .bin*-toiminnon kautta avataan ohjelmalla aikaisemmin tallennettu binääritiedosto tarkastelua varten. *Save to .bin*-toiminto tallentaa nykyisen tarkastelun kohteena olevan datan binäärimuotoisena haluttuun tiedostoon, josta se voidaan myöhemmin avata analysointiin varten. *Save to .txt*-toiminnolla tallennetaan ohjelman vastaanottamat

datapaketit tekstimuotoisena haluttuun tiedostoon. *Exit*-toiminto lopettaa Serial Analyzer 1.0 ohjelman suorituksen.

*Edit*-valikko pitää sisällään *Preferences*- ja *Clear*-toiminnot. *Preferences*-toiminnon kautta asetetaan ohjelman mittausasetukset siitä aukeavan *Preferences*-ikkunan kautta. *Clear*-toiminto tyhjentää käyttöliittymän näkymät, mutta toiminnolla ei kuitenkaan tyhjennetä ohjelmalle asetettuja mittausasetuksia. Mittausasetukset asetetaan kanavakohtaisesti kuvassa 7.5 näkyvän *Preferences*-ikkunan kautta. Asetettavia asetuksia ovat mitattavien signaalien bittinopeus (*Bitrate*), datapakettien väli (*Packet Gap(chr)*), kynnysjännite (*Threshold Voltage(V)*), mitattava signaalitaso (*Signal Level*), signaalien kääntäminen (*Invert Signals*) sekä kanavalle asetettavat mitattavat signaalit (*Store/View Signals*). *Packet Gap*-asetus määrää, mitkä vastaanotetut signaalipaketit yhdistetään samaan datapakettiin kuuluvaksi. Asetuksena annetaan merkkien määrä, josta ohjelma generoi ajan, joka vastaa merkkien lähettämiseen kuluvaan aikaa. Samaan datapakettiin kuuluvat ne signaalipaketit, joiden vastaanottoväli on maksimissaan asetettu *Packet Gap*.



**Kuva 7.5.** Mittausasetukset asetetaan *Preferences*-ikkunan kautta.

Mitattavan signaalitason valinta vaikuttaa siihen, mitä mittausasetuksia ohjelman käyttäjä voi itse asettaa sarjaliikenneanalysaattorille. CMOS/TTL-tasoisia signaaleja mitattaessa käyttäjä voi vapaasti valita kuvassa 7.5 asetettavat mitattavat signaalit, asettaa kynnysjännitteen sekä valita signaalien kääntämisen. RS-422/485-standardin signaaleja mitattaessa kynnysjännitettä sekä signaalien kääntämistä ei käyttäjä voi asettaa. Mitattavista signaaleista voidaan valita vain TX- ja RX-signaalit. RS-232-standardin signaalien mittaamisessa kynnysjännite on asetettu kiinteästi 2,0 V:in. Signaalien kääntäminen on mahdollista, ja käyttäjä voi asettaa vapaasti mitattavat signaalit.

*View*-valikossa on signaalinäkymän lähentämiseen ja loitontamiseen tarkoitetut toiminnot *Zoom+* ja *Zoom-*. Lähentämisen ja loitontamisen aikana signaalinäkymä keskitetään ruudun keskelle. Signaalinäkymän lähentäminen ja loitontaminen onnistuu lisäksi tietokoneen hiiren rullalla.

*Help*-valikossa on Serial Analyzer 1.0 ohjelman käyttöön tarkoitettuja ohjeita sekä tietoa ohjelmasta. Ohjelman käyttäjä pääsee näihin valitsemalla *Help*-valikon *About*-toiminnon.

*Pää*-valikon alapuolella on työkalupalkki, jossa ovat toiminnot mittauksen aloittamiseen ja lopettamiseen. Työkalupalkin toiminnoilla voidaan signaalinäkymää lisäksi lähentää ja loitontaa sekä valita GPS-tahdistus. Signaalien mittaus aloitetaan painamalla työkalupalkin *Start RX* -painiketta, jolloin mittaus alkaa niillä asetuksilla, jotka *Preferences*-ikkunassa on asetettu. Mittaus lopetetaan painamalla *Stop RX* -painiketta. Painikkeilla *Zoom+* ja *Zoom-* on vastaavat toiminnot kuin päävalikon *View*-valikossa olevilla toiminnoilla *Zoom+* ja *Zoom-*. *GPS sync* -valinnan ollessa päällä asetetaan mittauksen alkaessa GPS-tahdistus.

### 7.3 Signaalien vastaanottaminen

Signaalien vastaanottaminen sarjaliikenneanalysaattorista toteutetaan PC-ohjelmassa omalla säikeellä. Säie luodaan käyttäjän painaessa *Start RX* -painiketta, jolloin datan vastaanottaminen USB-portista alkaa. Vastaanotettu signaalipaketti on luvussa 6.4 määritellyn kaltainen. Signaalipaketti on kooltaan 10 tavua, ja se sisältää signaalin tunnisteiden, aikaleiman ja datan. Jokainen vastaanotettu signaalipaketti tallennetaan binäärimuotoiseen väliaikaistiedostoon, joka luodaan mittauksen alkaessa. Käyttäjän painaessa *Stop RX* -painiketta datan vastaanottaminen USB-portista lopetetaan ja säikeen väliaikaistiedostoon tallentamat signaalipaketit siirtyvät pääohjelman käsittelyyn.

Signaalipakettien vastaanottaminen toteutettiin aluksi myös niin, että sarjaliikenneanalysaattorilta vastaanotettu signaalipaketti tallennettiin Python-ohjelmointikielen tarjoamaan tietorakenteeseen. Laitteelle tehdyissä testeissä kävi kuitenkin ilmi, että tietyn ajanjakson jälkeen sarjaliikenneanalysaattorin FT2232H USB-UART/FIFO:n sisältämä puskuri täyttyi. Puskurin täytyttyessä PC-ohjelmalle

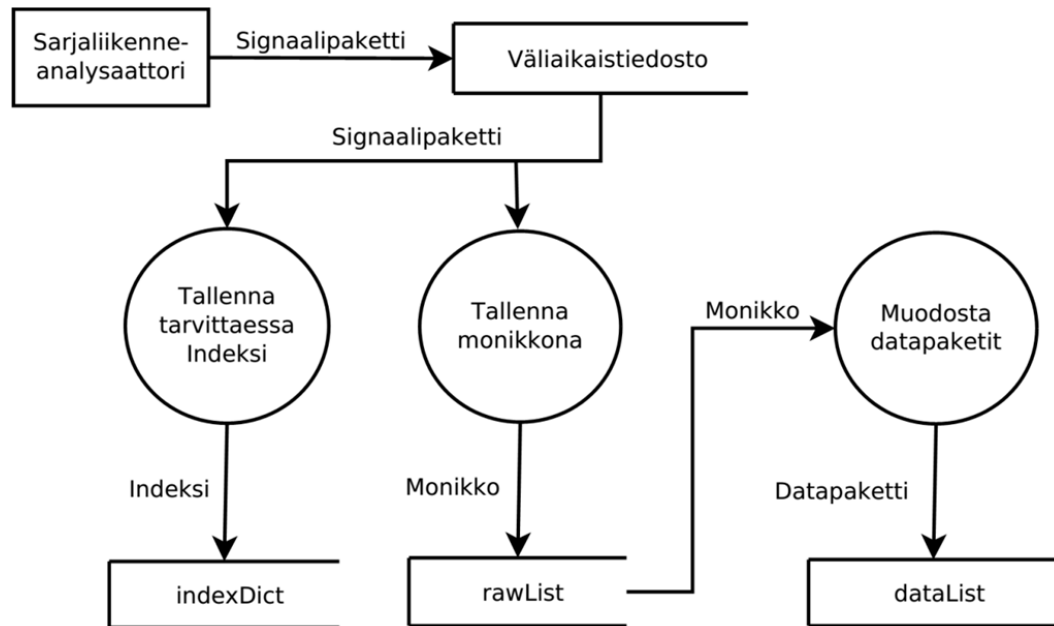
lähetettyjen signaalipakettien sisältämää dataa menetettiin. Puskurin täyttyminen johtui siitä, että PC-ohjelman käyttämä tietorakenne ei pystynyt tallentamaan vastaanotettuja signaalipaketteja vakionopeudella.

Jokaisesta vastaanotetusta signaalipaketista luodaan Python-ohjelmointikielen monikko (engl. tuple). Monikot ovat rakenteeltaan samanlaisia kuin listat, mutta ne ovat alkioiltaan kiinteitä, joten monikon alustamisen jälkeen monikko on muuttumaton. Monikot sopivat erinomaisesti tarkoitukseen, jossa tieto ei saa muuttua missään vaiheessa ohjelman suorituksen aikana. [46] Ohjelmaa testattiin myös niin, että signaalipaketteja varten tehtiin oma luokka. Jokaisesta vastaanotetusta signaalipaketista luotiin oman luokan instanssi, joka tallennettiin sellaisenaan ohjelman tietorakenteisiin. Toteutettu ratkaisu oli ohjelmaa suorittavalle PC:lle huomattavasti raskaampi kuin monikoilla toteutettu.

Jokaisen signaalipaketista luodun monikon alkioina ovat sarjaliikenneanalysoijan kaappaaman signaalin sekuntiarvo, aikaleima mikrosekunteina, signaalin tunniste ja data. Kättelysignaaleita kootusti sisältävästä signaalipaketista luodaan jokaista kättelysignaalia vastaava oma monikko, jossa monikon sisältämä data pitää sisällään kättelysignaalin sen hetkisen signaalin tason. Signaalin sekuntiarvoa käytetään hyödyksi indeksoinnissa, jolla monikko haetaan tietorakenteesta.

Signaalipaketeista luodut monikot tallennetaan yksiulotteiseen listarakenteeseen nimeltään *rawList*. Ennen monikon tallentamista *rawList*-listarakenteeseen tarkistetaan, onko pääohjelma vastaanottanut kyseisellä sekuntiarvolla jo yhtään signaalipakettia. Sekuntiarvoa käytetään *indexDict* dictionary-tietorakenteen hakuavaimena, johon on tallennettu jokainen uuden sekuntiarvon sisältävän signaalipaketista luodun monikon indeksi *rawList*-tietorakenteessa. Dictionary-tietorakenteesta saadaan tehokkaasti haettua sekuntiarvon perusteella ensimmäinen sillä sekuntiarvolla vastaanotetun signaalipaketin sijainti, kun signaaleita piirretään signaalinäkymään.

Pääohjelman *rawList*- ja *indexDict*-tietorakenteiden lisäksi TX- ja RX-linjoilta vastaanotetuista signaalipaketeista koostetaan datapaketteja, jotka tallennetaan listarakenteeseen nimeltään *dataList*. Samaan datapakettiin lasketaan kuuluvaksi ne signaalipaketit, joiden vastaanottoväli on maksimissaan asetettu datapakettien väli. Datapakettien väli *Packet Gap(chr)* asetetaan kuvassa 7.5 esitetyssä *Preferences*-ikkunassa. PC-ohjelman tietorakenteet ja niiden muodostuminen on esitetty kuvan 7.6 datakaaviossa.



**Kuva 7.6.** PC-ohjelman käyttämät tietorakenteet ja niiden suhteet toisiinsa.

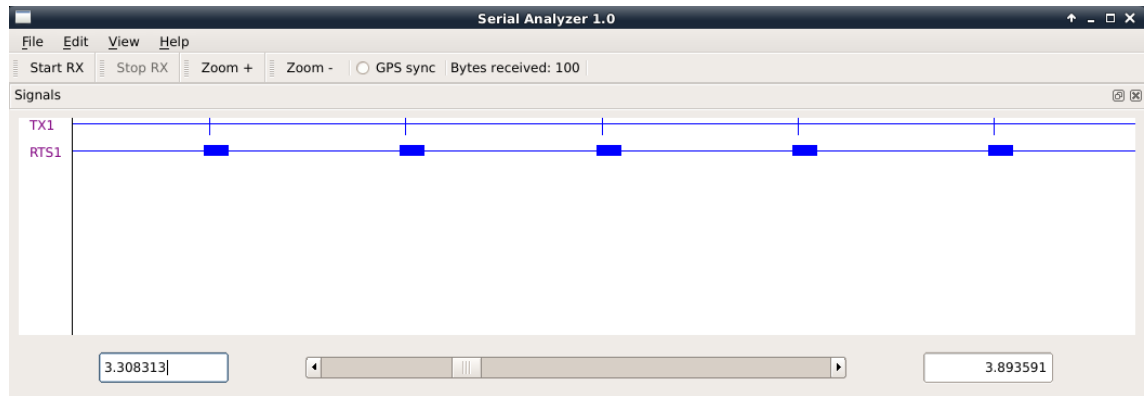
## 7.4 Signaalien piirto

Signaalinäkymään piirretään ne signaalit, jotka on valittu mitattavaksi. Näkymässä näytetään kerrallaan signaalit aikalaatikoiden määräämältä aikaväliltä. Signaalinäkymä näyttää oletusarvoisesti signaaleita 0–10 sekunnin ajalta. Aikalaatikoiden resoluutio on yksi mikrosekunti, joka vastaa vastaanotettujen signaalipakettien aikaleimojen resoluutiota.

Signaalit piirretään signaalinäkymään käyttäjän painaessa *Stop RX* -painiketta. Piirrettävät signaalit haetaan *rawList*-tietorakenteesta signaalinäkymän aikalaatikoiden minimi- ja maksimiarvojen perusteella. Minimiarvon avulla haetaan *indexDict*-tietorakenteesta ensimmäisen monikon indeksi, jonka signaalin sekuntiarvo on vähintään samansuuruinen piirrettävän signaalinäkymän aikalaatikon minimiarvon kanssa. Saadun indeksin perusteella etsitään *rawList*-tietorakenteesta ensimmäinen piirrettävä signaali, jonka aikaleima on vähintään samansuuruinen aikalaatikon minimiarvon kanssa.

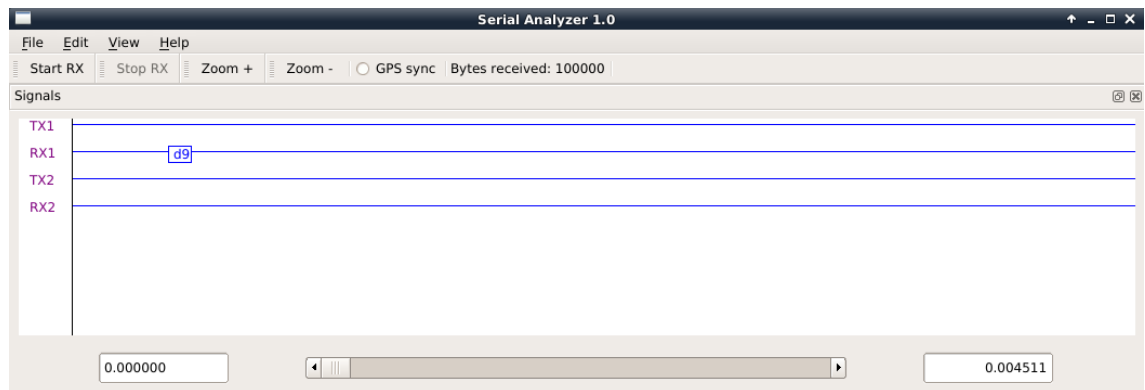
Indeksin hakeminen *indexDict*-tietorakenteesta nopeuttaa signaalien piirtoa, sillä koko tietorakennetta ei tarvitse käydä alusta lähtien läpi etsiessä ehtoja täyttävää ensimmäistä signaalia. Signaalipaketeista luodut monikot on tallennettu *rawList*-tietorakenteeseen aikajärjestyksessä, jolloin viimeisin signaalinäkymään piirrettävä signaali on suurimman aika-arvon perusteella helppo löytää. Kuvassa 7.7 on esitetty signaalinäkymä aikaväliltä 3,308313–3,893591 sekuntia. Mitattaviksi signaaleiksi on asetettu kanavan 1 signaalit TX 1 ja RTS 1.





**Kuva 7.7.** Sarjaliikenneanalysoijan kaappaamat signaalit TX1- ja RTS1-signaalilinjailta aikaväliltä 3,308313–3.893591 sekuntia.

Aikalaatikoiden arvot muuttuvat vieritettäessä signaalinäkymän alla olevaa vierityspalkkia. Vierityspalkin jäsenmuuttujana on arvo, joka kertoo vierityspalkin sijainnin. Vierityspalkki on tehty niin, että sen maksimiarvo vastaa viimeisimmän vastaanotetun signaalin aikaleimaa ja vierityspalkin nykyinen sijainti vastaa aina signaalinäkymän vasenta reunaa. Signaalinäkymän lähentäminen ja loitontaminen muuttavat näkymän lisäksi aikalaatikoiden arvoa samassa suhteessa. Vierityspalkin arvo muutetaan vastaamaan näkymän vasenta reunaa. TX- ja RX-linjoilta vastaanotetun datan heksadesimaalinen arvo näytetään tilanteessa, jossa näkymää on lähennetty tarpeeksi. Kuvassa 7.8 on esitetty signaalinäkymä, jossa näkymää on lähennetty niin, että signaalilinjan data on näkyvissä. RX 1-signaalilinjalta vastaanotettu data on 0xD9.



**Kuva 7.8.** Vastaanotetun datan heksadesimaalinen arvo näytetään kun signaalinäkymää on tarpeeksi lähennetty.

## 7.5 Signaalien analysointi

Datanäkymässä näytetään kerrallaan ruudulle mahtuva määrä datapakettien sisältämiä tietoja vastaanotetuista datapaketeista. Vastaanotettuja datapaketteja voidaan vierittää näkymän oikealla puolella olevan vierityspalkin (kuva 7.3) avulla. Ohjelman muistista haetaan aina kerrallaan ruudulla näytettävät datapaketit. Kaikkia vastaanotettuja datapaketteja ei lisätä näkymään kerralla, vaan datapaketit haetaan tarvittaessa tietorakenteesta. Datanäkymän vierityspalkin sijainti ja näkymän koko vaikuttavat siihen, mitkä datapaketit näytetään kerrallaan näkymässä. Datanäkymän vierityspalkin sijainnin arvo vastaa suoraan datapaketin indeksia *dataList*-tietorakenteessa, joka lisää datanäkymän päällimmäiseksi datapaketiksi. Toteutettu ratkaisu mahdollistaa ohjelman sujuvan toiminnan huolimatta vastaanotettujen datapakettien määrästä.

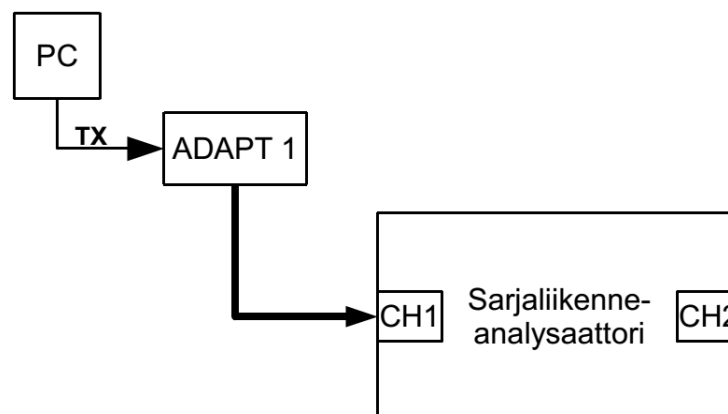
Vastaanotettujen TX- ja RX-linjojen tavujen näyttämiseen tarkoitettu analyysinäkymä on toteutettu samalla tavalla kuin datanäkymän datapakettien näyttäminen. Analyysinäkymässä näytetään kerrallaan ruudulle mahtuva määrä signaalipaketeista luotujen monikoiden data-arvoja. Analyysinäkymän vierityspalkin sijainti ja näkymän koko vaikuttavat siihen, mitkä tavut näytetään kerrallaan näkymässä. Tiedot vastaanotetuista tavuista saadaan *rawList*-tietorakenteesta vierityspalkin sijainnin arvon avulla. Toteutettu ratkaisu mahdollistaa analyysinäkymän sujuvan toiminnan vastaanotettujen tavujen määrästä huolimatta. Analyysinäkymä on moniulotteinen, sillä vastaanotettuja tavuja piirretään vertikaalisuunnan lisäksi myös horisontaalisesti.

## 8 LAITTEEN TESTAUS

Sarjaliikenneanalaysaattorin tarkkuutta, suorituskkyä sekä vastaanotetun datan oikeellisuutta testattiin RS-232-standardin signaaleilla kolmella erilaisella testitapauksella. Ensimmäisessä testitapauksessa testattiin laitteen tarkkuutta asettamalla sarjaliikenneanalaysaattori mittaamaan yksittäisiä merkkisarjoja. Toisessa testitapauksessa sarjaliikenneanalaysaattorin molemmat kanavat asetettiin vastaanottamaan merkkejä suurimmalla laitteen hyväksymällä bittinopeudella. Testitapauksessa testattiin laitteen suorituskkyä sekä vastaanotetun datan oikeellisuutta. Kolmannessa testitapauksessa testattiin sarjaliikenneanalaysaattorin ulkopuolista tahdistusta. Ulkopuolinen tahdistus saatiin GPS-vastaanottimen PPS-signaalista, jolla tahdistettiin kaksi sarjaliikenneanalaysaattoria.

### 8.1 Tarkkuuden mittaaminen

Tarkkuusmittauksessa tarkasteltiin sarjaliikenneanalaysaattorin mittaaman ASCII-merkin kestoja ja sitä, miten se vastaa sarjaportista lähetetyn merkin kestoja. Sarjaliikenneanalaysaattorilla mitattiin bittinopeuksilla 9600 bit/s, 38400 bit/s ja 115200 bit/s tietokoneelta 0,5 sekunnin välein lähetettyjä kolmen ASCII-merkin sarjoja. Merkkisarjoja lähetettiin jokaisella bittinopeudella yhteensä 1000 kappaletta. Mittauskytkentä on esitetty kuvassa 8.1.

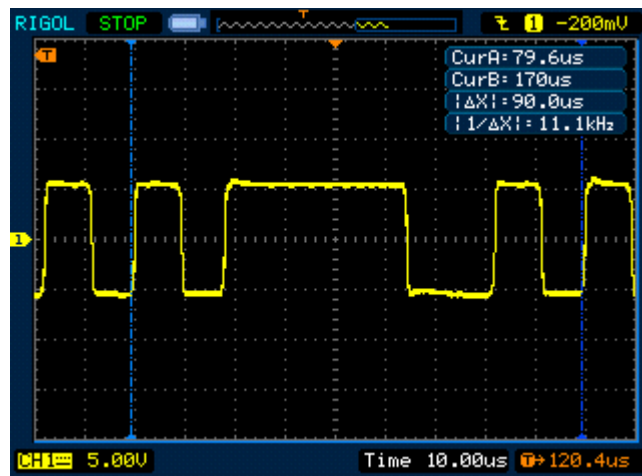


**Kuva 8.1.** Tarkkuusmittauksessa käytetty mittauskytkentä.

Data lähetettiin tietokoneen sarjaportista sarjaliikenneanalaysaattorin kanavaan 1 kytketyn mittausadapterin TX-linjaan. Sarjaliikenneanalaysaattorin kanavan 1 signaalitasoksi asetettiin RS-232. Kanavan 1 kynnyksjännite oli asetettu 2,0 V:in.

Tietokoneen sarjaportista lähetetyn merkin koko oli kymmenen bittiä, joka koostui yhdestä start- ja stop-bitistä sekä kahdeksasta data-bitistä. Kuvassa 8.1 oleva ADAPT 1 on signaalien kaappaukseen käytetty mittaussadapteri.

Tietokoneen sarjaportista lähetetyn merkin kesto saatiin laskettua ensimmäisenä ja keskimmäisenä vastaanotetun merkin aikaleimojen erotuksena. Merkin kesto mitattiin lisäksi oskilloskoopilla keskimmäisenä ja viimeisenä lähetetyn merkin start-bittien erotuksena. Kuvassa 8.2 on esitettyä tavun keston määrittäminen oskilloskoopin ruudulta. Kuvassa vasemmanpuoleinen kursori on asetettu keskimmäisenä ja oikeanpuoleinen kursori viimeisenä lähetetyn merkin start-bitin alkuun. Lähetetty merkki on ASCII-koodattu ”a”.



**Kuva 8.2.** Merkin keston mittaaminen oskilloskoopin ruudulta.

Taulukkoon 8.1 on koottu sarjaliikenneanalysaattorilla mitattu merkin kesto ( $t_{sa}$ ) bittinopeuksilla 9600 bit/s, 38400 bit/s ja 115200 bit/s. Merkin kesto on laskettu mitattujen merkkien keston keskiarvona. Taulukkoon on lisäksi lisätty suurin ja pienin sarjaliikenneanalysaattorilla mitattu merkin kesto. Taulukossa sarake  $t_{osk}$  on oskilloskoopilla mitattu merkin kesto ja sarake  $t_{teo}$  teoreettinen merkin kesto eri bittinopeuksilla. Teoreettinen merkin kesto saadaan jakamalla lähetetyn merkin pituus bitteinä käytetyllä bittinopeudella.

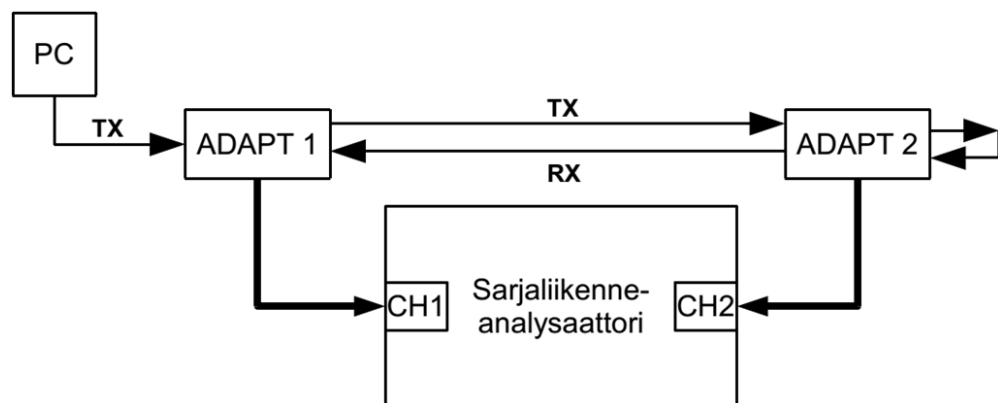
**Taulukko 8.1.** Lähetetyn merkin kesto eri bittinopeuksilla.

Bittinopeus (bit/s)	$t_{sa}$ (μs)		$t_{osk}$ (μs)	$t_{teo}$ (μs)
9600	1070,0	Max. 1075,0	1070,0	1041,7
		Min. 1067,0		
38400	266,8	Max. 267,0	266,0	260,4
		Min. 265,0		
115200	89,8	Max. 91,0	90,0	86,7
		Min. 89,0		

Mittaustuloksista havaitaan, että sarjaliikenneanalyysointilaite ja oskilloskoopilla mitatut merkkien kestot vastaavat toisiaan. Teoreettisesti laskettuun merkin keston verrattuna mitaustulokset sekä sarjaliikenneanalyysointilaite että oskilloskoopilla ovat eroavat. Erot teoreettisessa ja mitatussa arvossa johtuvat tietokoneessa käytetystä sarjaportista, jonka bittinopeus ei vastaa täydellisesti teoreettista bittinopeutta. Mittaustuloksista voidaan todeta sarjaliikenneanalyysointilaitteen tarkkuuden olevan tasolla, jolla saadaan tarkasti mitattua vastaanotettujen signaalien aikaleimat.

## 8.2 Suorituskyvyn mittaus

Sarjaliikenneanalyysointilaitteen suorituskykyä testattiin mittauksella, jossa sarjaliikenneanalyysointilaitteelle lähetettiin tietokoneen sarjaportista sekunnin välein 1024 ASCII-merkkiä. Mittauksen aikana 1024 ASCII-merkin sarjoja lähetettiin bittinopeudella 115200 bit/s yhteensä 500 kappaletta. Mittauskytkentä toteutettiin niin, että tietokoneen sarjaportista lähetetyt merkit vastaanotettiin sarjaliikenneanalyysointilaitteen molempien kanavien TX- ja RX-linjoissa. Mittauskytkentä on esitetty kuvassa 8.3.



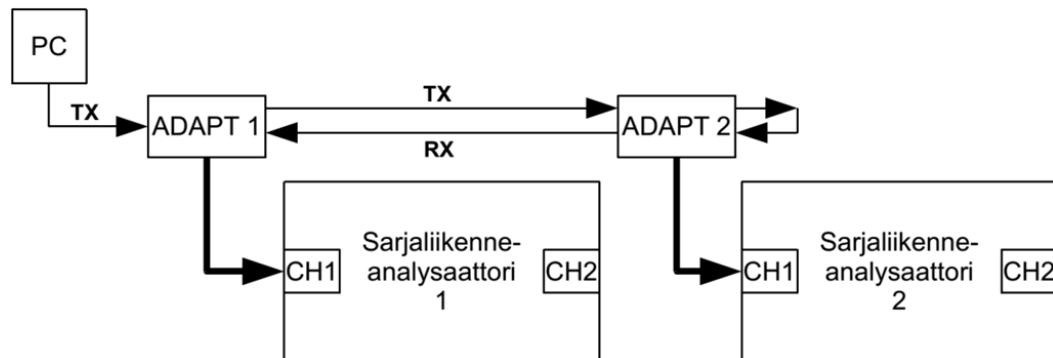
**Kuva 8.3.** Sarjaliikenneanalyysointilaitteen suorituskykytestin mittauskytkentä.

Merkit lähetettiin sarjaliikenneanalyysointilaitteen kanavaan 1 kytketyn mittausadapterin ADAPT 1 TX-linjaan. Mittausadapterista signaali jatkettiin kanavassa 2 olevan mittausadapterin ADAPT 2 TX-linjaan. Mittausadapterista ADAPT 2 signaali kuitettiin takaisin RX-linjaa pitkin mittausadapterille ADAPT 1. Kyseisellä mittauskytkennällä saatiin kuormitettua laitteen molempia kanavia samanaikaisesti, sillä sama data liikkui laitteen molempien kanavien TX- ja RX-linjoissa. Sarjaliikenneanalyysointilaitteesta molempien kanavien signaalien tasoiksi asetettiin RS-232 sekä bittinopeudeksi 115200 bit/s. Kanavien kynnysjännitteet oli asetettu 2,0 V:in.

Laitteen riittävä suorituskyky voitiin todentaa, koska laitteen vastaanottama data vastasi tietokoneen sarjaportista lähetettyä dataa. Mittauskytkennästä johtuen sama data vastaanotettiin muutaman mikrosekunnin tarkkuudella neljä kertaa. Vastaanotetun datan aikaleimojen perusteella voitiin laskea myös lähetetyn merkin kesto, joka vastasi luvussa 8.1 tehdyn tarkkuusmittauksen merkin kesto.

### 8.3 Ulkopuolinen tahdistus

Sarjaliikenneanalyysoitsajan ulkopuolista tahdistusta testattiin tahdistamalla kaksi sarjaliikenneanalyysoitsajaa GPS-vastaanottimelta saatavalla PPS-signaalilla. Tietokoneen sarjaportista lähetettiin 0,5 sekunnin välein kolme ASCII-merkkiä molemmille sarjaliikenneanalyysoitsajille. Merkkejä lähetettiin mittauksen aikana yhteensä 1000 kappaletta bittinopeudella 115200 bit/s. Mittauskytkentä toteutettiin niin, että tietokoneen sarjaportista lähetetyt merkit vastaanotettiin molempien sarjaliikenneanalyysoitsajien kanavien 1 TX- ja RX-linjoissa. Mittauksessa käytetty kytkentä on esitetty kuvassa 8.4.



**Kuva 8.4.** Ulkopuolisessa tahdistuksessa käytetty mittauskytkentä.

Merkit lähetettiin sarjaliikenneanalyysoitsajan kanavaan 1 kytketyn mittausadapterin ADAPT 1 TX-linjaan. Mittausadapterista signaali jatkettiin sarjaliikenneanalyysoitsajan 2 kanavaan 1 kytketyn mittausadapterin ADAPT 2 TX-linjaan. Mittausadapterista ADAPT 2 signaali kuitettiin takaisin RX-linjaa pitkin mittausadapterille ADAPT 1. Mittauskytkennällä saatiin kuormitettua molempien sarjaliikenneanalyysoitsajien yhden kanavan TX- ja RX-linjoja. Sarjaliikenneanalyysoitsajien signaalien tasoiksi asetettiin RS-232 sekä bittinopeudeksi 115200 bit/s. Sarjaliikenneanalyysoitsajien kanavien kynnyksjännitteet oli asetettu 2,0 V:in.

Mittauskytkennästä johtuen molemmat sarjaliikenneanalyysoitsajat vastaanottivat samanaikaisesti tietokoneen sarjaportista lähetettyjä kolmen ASCII-merkin sarjoja. GPS-tahdistuksella mahdollistettiin mittauksen alkaminen molemmissa sarjaliikenneanalyysoitsajissa samanaikaisesti, jolloin sarjaliikenneanalyysoitsajien vastaanottamien signaalipakettien aikaleimat vastasivat toisiaan.

Mittaustuloksista havaittiin sarjaliikenneanalyysoitsajien vastaanottaneen täsmällisesti oikean määrän tietokoneen sarjaportista lähetettyjä merkkejä, mutta aikaleimojen erotus kasvoi mittauksen edetessä. Aikaleimojen eroavaisuuksien syynä oli käytetyn kideoskillaattorin tarkkuus. Aikaleimoista voitiin laskea muutoksen kasvavan 0,06 ppm jokaista mittaukseen kuluvaan sekuntia kohden, joka vuorokaudessa

on noin 5 ms. TCXO-kideoskillaattorin datalehti mainitsee kiteen tarkkuudeksi 0.28 ppm, joten tahdistuksesta saatavien mittaustulosten voidaan todeta pitävän paikkaansa.

Pidemmän ajanjakson mittauksissa sarjaliikenneanalysaattoreiden kideoskillaattorin tarkkuus tulee ottaa huomioon mittaustuloksissa. PPS-signaalilla tehtävä tahdistus tehdään vain mittauksen alkaessa, joten kideoskillaattoreiden taajuuserosta johtuva vaikutus kasvaa mittauksen edetessä. Tahdistuksen toimintaa voitaisiin tehostaa niin, että PPS-signaalin avulla säädettäisiin millisekunnin laskemiseen käytettävien sarjaliikenneanalysaattorin rekisterien arvoja vastaamaan lähemmäksi todellista 1ms:n kestoja.

## 9 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä diplomityössä suunniteltiin ja toteutettiin sarjaliikenneanalysaattori TTL/CMOS-tasoisten, RS-232-, RS-422- ja RS-485-standardien signaalien mittaamiseen. Lisäksi sarjaliikenneanalysaattorin asetuksia ja signaalien analysointia varten toteutettiin erillinen PC-ohjelma. Työn tavoitteena oli kehittää jo markkinoilla oleviin sarjaliikenneanalysaattoreihin verrattuna monikäyttöisempi laite, joka soveltuisi erilaisiin mittaustilanteisiin. Kaupallisesti tarjolla olevissa laitteissa puutteina ovat kahden kanavan samanaikainen mittaus, fyysisesti eri paikoissa sijaitsevien sarjaliikenneanalysaattoreiden tahdistaminen sekä useiden erilaisten sarjaliikennestandardien mittaaminen yhdellä laitteella. Kaikkia edellä mainittuja ominaisuuksia löytyy kaupallisesti tarjolla olevista laitteista, mutta kaikkia ominaisuuksia ei ole toteutettu samassa laitteessa.

Diplomityön suurimpien haasteiden ajateltiin olevan laitteen suunnittelussa, jotta annettuihin toiminnallisiin vaatimuksiin päästäisiin. Kuitenkin suurimmat haasteet työn edetessä ilmenivät PC-ohjelman toteutuksessa. Työssä ei toteutettu pelkästään signaaleja kaappaavaa laitetta, vaan laitteen piti myös sulavasti pystyä kommunikoidaan PC-ohjelman kanssa. Ongelmia aiheuttivat suuren datamäärän vastaanottaminen ja analysoiminen. Kuormitustesteissä kävi ilmi, että tietyn ajanjakson jälkeen sarjaliikenneanalysaattorin FT2232H USB-UART/FIFO:n sisältämä puskuri täyttyi. Puskurin täyttyessä PC-ohjelmalle lähetettyjen signaalipakettien sisältämää dataa menetettiin. Puskurin täyttyminen johtui siitä, että PC-ohjelman käyttämä Python-ohjelmointikielen tarjoama tietorakenne ei pystynyt tallentamaan vastaanotettuja signaalipaketteja vakionopeudella. Ongelma ratkaistiin tallentamalla signaalipaketit suoraan binäärimuotoisena tiedostoon, josta mittausten lopettamisen jälkeen signaalien piirtoon ja analysointiin tarvittava data muodostettiin. Toteutettu ratkaisu oli ohjelmaa suorittavalle PC:lle kevyempi.

Suuren datamäärän analysoinnissa ongelmia aiheutti PC-ohjelman varaama keskusmuistin määrä ohjelman suorituksen aikana. Jokaisesta vastaanotetusta ja analysoidusta datasta luotiin oman luokan instanssi, joka tallennettiin sellaisenaan ohjelman tietorakenteisiin. Toteutettu ratkaisu oli ohjelmaa suorittavalle PC:lle liian raskas tilanteissa, joissa analysoidavan datan määrä oli kuormitustesteissä käytetyn datamäärän kertaluokkaa. Ongelma ratkaistiin käyttämällä luokkien sijaan Python-ohjelmointikielen tarjoamia kevyempiä monikkoja (engl. tuple) signaalipakettien tallentamiseen.

TTL/CMOS-tasoisten ja RS-232-standardin signaalien kynnysjännitteen säätöön tarkoitetut operaatiovahvistimet toimivat lopullisessa toteutuksessa vain puskurina, sillä



tasonmuuntimen komparaattorin positiivisen takaisinkytkennän vaikutusta mikrokontrollerin DAC:n signaalin kertojana ei otettu huomioon.

Sarjaliikenneanalyysoitsijan käytännön hyöty todettiin sarjaliikenneanalyysoitsijalle tehdyissä testeissä, joissa huomattiin tietokoneen sarjaportin bittinopeuden vaihdelleen teoreettisesta bittinopeudesta. Sarjaliikenneanalyysoitsijan kuormitustesti toteutettiin myös niin, että tietokoneen USB-porttiin liitettiin USB-RS232-muunnin, jonka kautta sarjaliikenneanalyysoitsijalle analysoitavat merkit lähetettiin. Mittaustuloksista voitiin havaita USB-RS232-muuntimen olevan tarkempi teoreettisen bittinopeuden suhteen tietokoneessa olevaan sarjaporttiin verrattuna.

Toteutettu sarjaliikenneanalyysoitsija ja PC-ohjelma saavuttivat niille asetetut vaatimukset. Sarjaliikenneanalyysoitsija sisältää kaksi kanavaa, joilla voidaan samanaikaisesti kaapata kahden laiteparin välisen dataliikenteen signaalit. Lisäksi laitteen tahdistaminen onnistuu GPS-signaalilla, jolloin fyysisesti erillään sijaitsevien sarjaliikenneanalyysoitsijoiden vastaanottamaa dataa on mahdollista analysoida ajallisesti kohdakkain. Sarjaliikenneanalyysoitsija tarjoaa lisäksi laajennusmahdollisuuksia toimintoihin, joita tässä työssä ei vielä toteutettu. Laite sisältää tarvittavan laitteistototeutuksen RS-232-, RS-422- ja RS-485-standardien signaalien generoimiseen. Signaaleja generoimalla sarjaliikenneanalyysoitsijalla pystytään lähettämään dataa tutkittavien laitteiden signaalilinjoille ja analysoimaan laitteiden toimintaa tietyillä signaalilinjojen syötteillä.

## LÄHTEET

- [1] Murthy, C.S.V. Data Communication and Networking. 2010. Global Media. pp. 506.
- [2] Qian, K., Haring, D. & Cao, L. Embedded Software Development with C. 2009. pp. 179-202.
- [3] Katupitiya, J. & Tordon, M.J. 20 System Interfaces. In: Bishop, R.H. (ed.). The Mechatronic System Control, Logic, and Data Acquisition. Vol. 2. 2007. CRC Press Inc. pp. 704.
- [4] Canton, M.P. Chapter 20. Communications. In: Sanchez, J. & Canton, M.P. Embedded Systems Circuits and Programming. 2012. CRC Press. pp. 663-661.
- [5] Stallings, W. Data and Computer Communications. 6<sup>th</sup> Edition. 2000. Prentice-Hall. pp. 810.
- [6] Dixon, A.C. & Antonakos, J.L. A Practical Approach To Digital Electronics. 2000. Prentice-Hall. pp. 376.
- [7] MacKay, S., Wright, E. & Park, J. Practical Data Communications for Instrumentation and Control. 2003. Newnes. pp. 402.
- [8] Bolton, W. Programmable Logic Controllers. 4<sup>th</sup> Edition. 2006. Elsevier. pp.304.
- [9] Buchanan, W. Computer Busses. 2000. CRC Press. pp. 528.
- [10] Gao, K. & Mo, B. Design and Application of New Avionics Control Bus upon SPI. System Science, Engineering Design and Manufacturing Information (ICSEM), 2011 International Conference. October 22–23, 2011. Guiyang, Kiina 2011. pp. 203-205.
- [11] Smith, J.R. Programming the PIC Microcontroller with MBasic. 2005. Newnes. pp 801.
- [12] Ying, B. The Windows Serial Port Programming Handbook. 2004. Auerbach Publishers Inc. pp. 824.

- [13] Boed, V. Networking and Integration of Facilities Automation Systems. 1999. CRC Press. pp. 264.
- [14] The RS232 Standard. CAMI Research Inc [viitattu 5.7.2013]. Saatavissa: [http://www.camiresearch.com/Data\\_Com\\_Basics/image23.gif](http://www.camiresearch.com/Data_Com_Basics/image23.gif)
- [15] D-subminiature. Wikipedia [viitattu 23.9.2013]. Saatavissa: <http://en.wikipedia.org/wiki/D-subminiature>
- [16] Radio-Electronics.com. 2013 [viitattu 15.2.2013]. Saatavissa: [http://www.radio-electronics.com/info/telecommunications\\_networks/rs232/eia-rs232-c-d-standards.php](http://www.radio-electronics.com/info/telecommunications_networks/rs232/eia-rs232-c-d-standards.php)
- [17] Reynders, D. Mackay, S. & Wright, E. Practical Industrial Data Communications: Best Practice Techniques. 2005. Butterworth-Heinemann. pp. 432.
- [18] Axelson, J. Serial Port Complete: COM Ports, USB Virtual COM Ports, and Ports for Embedded Systems, 2Ed. 2007. Lakeview Research. pp. 400.
- [19] Park, J. & Mackay, S. Practical Data Acquisition for Instrumentation and Control Systems. 2003. Elsevier. pp. 271-284.
- [20] Axelson, J. USB Complete: The Developer's Guide (4<sup>th</sup> Edition). 2009. Lakeview Research. pp. 529.
- [21] Multi Protocol Analyzer LE-8200. 2013. Lineeye CO., LTD [viitattu 5.4.2013]. Saatavissa: [http://www.lineeye.com/html/p\\_8200.html](http://www.lineeye.com/html/p_8200.html)
- [22] Serial RS232 and RS485 analyser. 2013. IFTOOLS GmbH [viitattu 5.4.2013]. Saatavissa: <https://iftools.com/start/index.en.php>
- [23] Manual MSB-RS232. 2013. IFTOOLS GmbH [viitattu 5.4.2013]. Saatavissa: <https://iftools.com/download/manuals/msb-rs232-en.pdf>
- [24] Manual MSB-RS485. 2013. IFTOOLS GmbH [viitattu 5.4.2013]. Saatavissa: <https://iftools.com/download/manuals/msb-rs485-en.pdf>
- [25] RS422/485 Analyser. 2013. IFTOOLS GmbH [viitattu 5.4.2013]. Saatavissa: <https://iftools.com/analyzer/msb-rs485/index.en.php>

- [26] MSP430F2618 datasheet. 2012. Texas Instruments [viitattu 1.6.2013]. Saatavissa: <http://www.ti.com/product/msp430f2618>
- [27] MSP430x2xx Family User's Guide. 2013. Texas Instruments [viitattu 1.9.2013]. Saatavissa: <http://www.ti.com/mcu/docs/mcuprodtechdoc.tsp?sectionId=95&tabId=1201&familyId=342&techDoc=6&docCategoryId=6&viewType=mostviewed3&DCMP=MSP430&HQS=Other+OT+msp430userguides>
- [28] DV75C datasheet. 2013. Connor-Winfield Corporation [viitattu 1.6.2013]. Saatavissa: <http://www.conwin.com/datasheets/tx/tx355.pdf>
- [29] TLV70233 datasheet. 2011. Texas Instruments [viitattu 1.6.2013]. Saatavissa: <http://www.ti.com/product/tlv70233>
- [30] IT530 datasheet. 2013. u-blox [viitattu 1.6.2013]. Saatavissa: <http://www.u-blox.com/en/gps-modules/pvt-modules/it530.html>
- [31] LP2951 datasheet. 2012. Texas Instruments [viitattu 1.6.2013]. Saatavissa: <http://www.ti.com/product/lp2951#technicaldocuments>
- [32] FT2232H datasheet. 2012. Future Technology Devices International Ltd [viitattu 1.6.2013]. Saatavissa: <http://www.ftdichip.com/Products/ICs/FT2232H.htm>
- [33] 93LC66B datasheet. 2011. Microchip Technology Inc [viitattu 1.6.2013]. Saatavissa: <http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?dDocName=en010910>
- [34] CD74HC4052 datasheet. 2011. Texas Instruments [viitattu 1.6.2013]. Saatavissa: <http://www.ti.com/product/cd74hc4052>
- [35] SC16C554DBIB64 datasheet. 2010. NXP Semiconductors [viitattu 1.6.2013]. Saatavissa: [http://www.nxp.com/products/interface\\_and\\_connectivity/uarts/four\\_channel/SC16C554DBIB64.html](http://www.nxp.com/products/interface_and_connectivity/uarts/four_channel/SC16C554DBIB64.html)
- [36] 18,432 MHz Quartz Crystals 7A Series datasheet. TXC Corporation [viitattu 1.6.2013]. Saatavissa: <http://www.txccrystal.com/images/pdf/7a.pdf>

- [37] IP4220CZ6 datasheet. 2011. NXP Semiconductors [viitattu 1.6.2013].  
Saatavissa: [http://www.nxp.com/products/esd\\_emi\\_and\\_signal\\_conditioning/application\\_specific\\_esd\\_and\\_esd\\_emi\\_solutions/usb\\_3\\_0\\_2\\_0\\_esata\\_esd\\_protection/IP4220CZ6.html](http://www.nxp.com/products/esd_emi_and_signal_conditioning/application_specific_esd_and_esd_emi_solutions/usb_3_0_2_0_esata_esd_protection/IP4220CZ6.html)
- [38] LTC2862 datasheet. 2011. Linear Technology Corporation [viitattu 1.6.2013]. Saatavissa: <http://www.linear.com/product/LTC2862>
- [39] MAX3243E datasheet. 2009. Texas Instruments [viitattu 1.6.2013]. Saatavissa: <http://www.ti.com/product/max3243e>
- [40] MCP6L02 datasheet. 2011. Microchip Technology Inc [viitattu 1.6.2013]. Saatavissa: <http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?dDocName=en539991>
- [41] LMV393 datasheet. 2012. Texas Instruments [viitattu 1.6.2013]. Saatavissa: <http://www.ti.com/product/lmv393>
- [42] SN74LVC86A datasheet. 2004. Texas Instruments [viitattu 1.6.2013]. Saatavissa: <http://www.ti.com/product/sn74lvc86a>
- [43] SN74HC573A datasheet. 2003. Texas Instruments [viitattu 1.6.2013]. Saatavissa: <http://www.ti.com/product/sn74hc573a>
- [44] SN74HC688 datasheet. 2003. Texas Instruments [viitattu 1.6.2013]. Saatavissa: <http://www.ti.com/product/sn74hc688>
- [45] 1455L1201 datasheet. Hammond Manufacturing [viitattu 1.10.2013]. Saatavissa: <http://www.hammondmfg.com/1455.htm>
- [46] Lutz, M. & Ascher, D. Learning Python, Second Edition. 2003. O'Reilly. pp. 591.